

Universidade Federal do Paraná

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil

Janaína Setin Motter

**Propriedades de concretos betuminosos usinados a quente com o
uso de agregado graúdo reciclado de concreto**

Curitiba

2013

Universidade Federal do Paraná

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil

Janaína Setin Motter

**Propriedades de concretos betuminosos usinados a quente com o
uso de agregado graúdo reciclado de concreto**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, na área de concentração em Materiais e Estruturas, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Fagundes Rosembach Miranda

Co-Orientador: Prof. MEng. Djalma Rocha Al Chueyr Martins Pereira

Curitiba

2013

Motter, Janaína Setin

Propriedades de concretos betuminosos usinados a quente com o uso de agregado graúdo reciclado de concreto / Janaína Setin Motter.

– Curitiba, 2013.

260 f. : il.; tab.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil.

Orientador: Leonardo Fagundes Rosemback Miranda

Coorientador: Djalma Rocha Al Chueyr Martins Pereira

1. Pavimentos de asfalto. 2. Concreto - Pavimentos de betume.

I. Miranda, Leonardo Fagundes Rosemback. II. Pereira, Djalma Rocha Al-Chueyr Martins. III. Título.

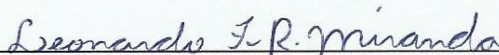
CDD 625.85

TERMO DE APROVAÇÃO

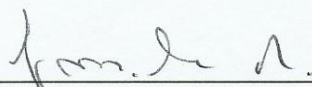
JANAÍNA SETIN MOTTER

PROPRIEDADES DE CONCRETOS BETUMINOSOS USINADOS A QUENTE COM O USO DE AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE CONCRETO

Dissertação aprovada como requisito à obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, área de concentração em Materiais e Estruturas, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, por comissão formada pelos professores:



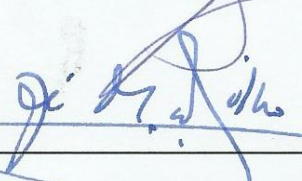
Orientador: Prof. Dr. Leonardo Fagundes Rosemback Miranda
Departamento de Construção Civil, UFPR



Co-Orientador: Prof. MEng. Djalma Rocha Al Chueyr Martins Pereira
Departamento de Transportes, UFPR


Prof^a. Dr^a. Liedi Légi Bariani Bernucci

Departamento de Engenharia de Transportes, USP



Prof. Dr. José Marques Filho

Departamento de Construção Civil, UFPR

Curitiba, 29 de maio de 2013.

DEDICATÓRIA

Ao meu esposo, Danilo.

Aos meus pais, Léo e Ana.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, que me concedeu saúde e forças para concluir mais essa etapa muito significativa em minha vida.

Agradeço ao meu esposo, Danilo Victor Max, o homem da minha vida, a quem dedico esse trabalho, por ter me auxiliado sem reservas durante todo o período do mestrado, por ter me incentivado na realização desse sonho, por ter se juntado comigo durante as madrugadas de estudo, afim de não me deixar sozinha, por sempre ter me feito companhia. Saiba que essa conquista também é sua!

Aos meus pais, Leovigildo Carbonera Motter e Ana Maria Setin Motter, a quem também dedico esse trabalho, que são fontes de amor e carinho inesgotáveis, que são meus exemplos de dignidade, honestidade, generosidade, bondade, determinação, superação e dedicação e que sempre me forneceram todo o apoio possível para os estudos, de forma que, o mérito de eu ter chegado até aqui é da educação que recebi de vocês ao longo da minha vida.

À minha irmã, Natalie Setin Motter, pelo apoio, compreensão e incentivo despendidos.

A todos os familiares, amigos e colegas de trabalho que me apoiaram, incentivaram e torceram por mim.

Em especial, agradeço ao meu orientador por essa oportunidade, pela idealização desse trabalho cujo escopo é de extrema importância para o futuro da pavimentação e da gestão de resíduos da construção civil não só do Brasil, como do mundo, pela confiança em mim depositada, pelo conhecimento comigo compartilhado durante todo nosso período de convivência, pela pessoa dedicada, interessada, inteligente e paciente que é, e que se tornou um grande amigo durante essa trajetória. Prof. Dr. Leonardo Fagundes Rosembach Miranda, muito obrigada por tudo!

Ao meu co-orientador, Prof. MEng. Djalma Rocha Al Chueyr Martins Pereira, pela disponibilidade em auxiliar na execução desse trabalho, pelo amplo conhecimento e vasta experiência partilhados em prol desse trabalho, pelos treinamentos ofertados, pela acessibilidade e dispêndio.

À Prof^a. Dr^a. Marianne do Rocio Mello Maron da Costa, Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, e à Ziza Regina Nichele, Secretária do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, agradeço pela disponibilidade, compreensão e dedicação despendidas ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil.

Agradeço aos Professores Doutores que ministram as disciplinas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, pela excelência, dedicação e preocupação em transmitir seus conhecimentos. Agradeço em especial aos professores que ministraram as disciplinas que cursei, no período entre 2011 e 2012, à Prof^a. Dr^a. Adriana de Paula Lacerda Santos, pela disciplina Planejamento e Controle de Custos, Ao Prof. Dr. Aloisio Leoni Schmid e Prof. Dr. Sérgio Fernando Tavares, pela disciplina Métodos de Pesquisa, à Prof^a. Dr^a. Cristina de Araújo Lima, pela disciplina Espaço Urbano – Planejamento e Gestão, ao Prof. Dr. José Marques Filho, pela disciplina Planejamentos e Experimentos, ao Prof. Dr. Leonardo Fagundes Rosembach Miranda, pela disciplina Tópicos Especiais em Construção – Reciclagem de resíduos de construção, à Prof^a. Dr^a. Marianne do Rocio Mello Maron da Costa e à Empresa Votorantim, pela disciplina Tópicos Especiais em Construção – Tecnologia de Argamassas, e ao Prof. Dr. Mauro Lacerda Santos Filho, pela disciplina Patologia e Recuperação de Estruturas.

Da mesma forma, agradeço aos colegas que conviveram comigo durante essa jornada, compartilhando experiências e formando equipes de trabalho nas disciplinas cursadas. Cito aqui em especial os colegas com quem tive contato mais próximo, Adriana Verchai de Lima Lobo, Alécio Júnior Mattana, Alexandre Bessa Martins Alves, Bruna Godke, Corina Ribeiro, Débora Helena Pirelles, Everton Heuko, Fabrício Andrade, Fernanda Pereira Grein, Graciele Tanaka, Hélio Haruo Maeda, Isabela Oliveira, Isabella Marchesini, Jade Baptista Pires Bittar, Juliana Loss, Leidimara Martins, Luana Scheifer, Maria Isabel Bittencourt, Maria Izabel Zanlorenzi, Michael Antony, Michelle Caroline Nogueira de Araujo, Miguel Contani, Nivaldo Soares Filho, Pedro Silva, Rafaela Fortunato, Roberto Caldeira e Rogério Lemos. Desejo a todos muito sucesso!

À minha amiga Adriana Verchai de Lima Lobo, agradeço também por todo o companheirismo durante esses dois anos e meio de muita luta e dedicação. Enfatizo aqui, principalmente, os incentivos recebidos durante os momentos mais difíceis

dessa jornada. Agradeço você por todas nossas experiências compartilhadas, enfim, por termos conseguido chegar até aqui, nos apoiando e ajudando uma à outra.

Aos Professores e Doutores Liedi Légi Bariani Bernucci e José Marques Filho, agradeço às contribuições realizadas quando da minha qualificação, que em muito contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos alunos da graduação da Universidade Federal do Paraná que auxiliaram na execução dos ensaios apresentados nesse trabalho: Cátia Graeff, César Frandoloso, Fabiano Tomazin, Luiz Calhau e Murilo Prado.

Ao Laboratório de Tecnologia de Pavimentação do Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da USP, em especial à Prof^a. Dr^a. Liedi, ao Prof. Dr. Edson Moura, à Diomaria Rocha Santos e ao Erasmo Ferreira Alves, que se envolveram na execução do ensaio de deformação permanente na mesa compactadora e simulador tipo LCPC apresentado nessa pesquisa. Agradeço especialmente pela receptividade excepcional e a atenção despendida de todos os técnicos e pesquisadores do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação durante minha estadia em São Paulo.

Ao laboratório LACTEC, por ceder tanto local, quanto equipamentos e técnicos, cito aqui especialmente os Engenheiros Civis Marcel Luiz Escobedo e Jéferson Luiz Bronholo, para a realização do rompimento dos corpos de prova de concreto no britador de mandíbula, do peneiramento do ARCg após secagem em estufa, separando as frações brita 1 e pedrisco, e do ensaio de Abrasão Los Angeles de todos os agregados graúdos tipo brita 1 utilizados nessa pesquisa.

À empresa AFIRMA por ceder profissionais capacitados, cito especialmente a Engenheira Química Giovanna Gutierrez e os técnicos de laboratório Letícia e Gerson, por auxiliarem na organização do laboratório LAMP, onde foi realizada a grande maioria dos ensaios apresentados nesse trabalho, recém-implantado, por fornecerem treinamento nos equipamentos disponíveis e por auxiliar na moldagem dos corpos de prova que foram utilizados para a execução do ensaio resistência da mistura asfáltica compactada ao dano por umidade induzida, também conhecido como ensaio Lottman.

À empresa SUPERMIX, por disponibilizar os corpos de prova que geraram todos os agregados reciclados de concreto estudados nessa pesquisa.

À empresa ENGEFOTO, em especial ao Prof. MEng. Djalma Rocha Al Chueyr Martins Pereira, por ter fornecido o pó de pedra utilizado nessa pesquisa, possibilitando, assim, encaixar a granulometria das misturas dentro da faixa C do DNIT e também pelo inestimável auxílio do Luiz Reginaldo Rodrigues da Silva no treinamento de ensaios RT e MR e na realização dos ensaios Lottman deste trabalho.

À empresa MEGAPAV Construtora de Obras, pelo fornecimento do CAP 50/70, bem como as especificações do mesmo, utilizado nessa pesquisa.

À empresa CBB – Indústria e Comércio de Asfaltos de Engenharia Ltda., por disponibilizar de treinamento em ensaios de caracterização de CAP e o custo do ligante CAP 50/70, viabilizando a análise de custos apresentada nessa pesquisa.

À empresa Raphael F. Greca e Filhos Ltda., por disponibilizar o custo dos agregados naturais, bem como custo do transporte dos mesmos, viabilizando a análise de custos apresentada nessa pesquisa.

À empresa USIPAR, Usina de Recicláveis Sólidos Paraná S/A, por disponibilizar o custo dos agregados reciclados de concreto, bem como custo do transporte dos mesmos, viabilizando a análise de custos apresentada nessa pesquisa.

Por fim, agradeço a todos que, mesmo não citados, transmitiram seu apoio e carinho durante essa jornada e se felicitam com essa minha conquista.

RESUMO

MOTTER, J. S. Propriedades de concretos betuminosos usinados a quente com o uso de agregado graúdo reciclado de concreto. 2013. 260p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil, Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

Considere a seguinte questão: por que usar em via de tráfego local, materiais pétreos, se os mesmos podem ser substituídos por agregados alternativos que possibilitam ao concreto betuminoso usinado a quente características suficientes para atender aos requisitos exigidos? A quantidade de resíduos de construção gerados anualmente no Brasil é estimada em 500kg/hab.ano (Pinto, 1999) e supera o uso do material nas práticas já consolidadas, como a utilização de agregados reciclados em bases e sub-bases de pavimentos. Verifica-se a necessidade de desenvolvimento de métodos que permitam a aplicação do material em outras soluções, visando evitar a disposição irregular e contaminação de resíduos, ainda mais se tratando do agregado reciclado de concreto, considerado nobre. Essa pesquisa propõe o estudo de substituição de frações de agregados graúdos por agregados reciclados de concreto para a utilização na camada de concreto betuminoso usinado a quente, área na qual os estudos são muito recentes e escassos. Após verificar-se a não existência de diferenças significativas entre os resultados dos ensaios de absorção e massa específica real de agregados reciclados de concretos originados de concretos com 20, 30 e 40 MPa de resistência mecânica à compressão, o trabalho teve continuidade com o estudo de quatro teores de substituição de agregado natural por agregado graúdo reciclado de concreto de 30 MPa e uma mistura referência. Foi utilizada uma mesma curva granulométrica para todas as misturas, seguindo os limites previstos nas normas do DNIT para a faixa C. Foi utilizado concreto asfáltico CAP 50/70, cujas características corroboram com as exigências da ANP. Foi realizada a dosagem Marshall com complementação do ensaio RICE, chegando-se a parâmetros volumétricos satisfatórios e teor ótimo de ligante igual a 4,9% para a mistura referência e entre 6,0 e 6,9% para as demais misturas. Foram moldados corpos de prova com os teores ótimos de ligantes e realizado os ensaios de deformação permanente (LCPC), em que pode se verificar melhora nos resultados quando utilizados até 75% de agregado reciclado de concreto em substituição ao agregado natural, e de resistência da mistura asfáltica compactada ao dano por umidade induzida (ensaio Lottman), no qual a substituição de agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados de concreto implicou em melhoras na adesividade da mistura. E, por último, foi analisada a viabilidade econômica das misturas, que se mostrou mais favorável que outras análises verificadas na revisão bibliográfica realizada pela autora. Verifica-se que, apesar dos agregados graúdos reciclados de concreto possuírem maior absorção, maior abrasão Los Angeles e menor massa específica que agregados naturais, as misturas apresentaram resultados satisfatórios que se enquadraram nas especificações verificadas para emprego em concretos asfálticos de vias de baixo volume de tráfego, podendo, desta maneira, contribuir com o aproveitamento desses resíduos e minimizar os problemas relacionados à disposição irregular dos mesmos.

Palavras-chave: agregado reciclado de concreto, resíduo de construção e demolição, sustentabilidade, reciclagem de resíduos da construção civil, CBUQ.

ABSTRACT

MOTTER, J. S. Properties of hot mixed asphaltic concrete using recycled coarse concrete aggregate. 2013. 260sh. Thesis (Master) - Graduate Program in Civil Construction Engineering, Civil Construction Department, Federal University of Paraná. Curitiba, 2013.

Consider the following question: why use stone materials in local traffic roads if they can be replaced by alternative aggregates which gives the hot mixed bituminous concrete features enough to meet the demanded requirements? The amount of construction waste generated annually in Brazil is estimated to be 500kg/inhabitant/year (Pinto, 1999) and surpasses the use of the material in practices already consolidated, such as the use of recycled aggregates in bases and sub-bases of floors. The need for development of methods which allow the application of the material in other solutions is verified, with the aim of avoiding the irregular disposal and contamination of waste, especially in the case of recycled concrete aggregate, considered to be noble. This research proposes the study of the substitution of fractions of coarse aggregate by recycled concrete aggregates for using in the layer of hot mixed asphaltic concrete, area in which the studies are very recent and scarce. After verifying that there are no significant differences between the results of absorption essays and the specific gravity of recycled concrete aggregate originated from concrete with 20, 30 and 40 MPa of compressive mechanic resistance, the work has been continued with the study of four levels of substitution of natural aggregate with 30 MPa of coarse recycled concrete aggregate and a reference mixture. The same grain size distribution was used for all mixtures, according to the limits forecast in the National Department of Transport Infrastructure standards for band C. Asphalt concrete PAC 50/70 was used, whose characteristics corroborate the requirements of the National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels. The Marshall dosage with complementation of RICE assay was performed, achieving satisfactory volumetric parameters and an optimum asphalt content equal to 4.9% for the reference mixture and between 6.0 and 6.9% for the other mixtures. Bodies of proof were modeled with the optimum amounts of ligand and the permanent deformation essays (LCPC) performed, where it is possible to verify improvement in results when using up to 75% of recycled concrete aggregate replacing the natural aggregate, and the essay of compacted asphalt mixture resistance to damage by induced humidity (Lottman's essay), in which the substitution of natural coarse aggregates by recycled coarse aggregates of concrete implied in improvements in the mixture adhesiveness. And finally, the economic viability of the mixtures was analyzed, which was more favorable than other analyzes found in the literature review made by the author. It is verified that, despite the coarse recycled concrete aggregate having higher absorption, higher Los Angeles abrasion and lower specific gravity than natural aggregates, the mixtures showed satisfactory results that met the specifications verified for use in asphaltic concrete, thus indicating a possible technical viability for the use of asphaltic concrete in low traffic roads, and may in this way contribute to the recovery of such waste and minimization of problems related to its irregular disposal.

Keywords: recycled concrete aggregate, construction and demolition waste, sustainability, recycling of civil construction waste, HMAC.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1. A importância da construção civil no Brasil	16
1.2. O panorama atual das rodovias no Brasil	17
1.3. Políticas nacionais acerca da sustentabilidade	28
1.3.1. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981	28
1.3.2. Constituição Federal.....	30
1.3.3. Lei nº 8.666, de 21 de junho de 1993.....	32
1.3.4. Instrução Normativa nº01, de 19 de janeiro de 2010	32
1.3.5. Decreto nº 7.746, de 5 de junho de 2012.....	34
1.4. A importância da sustentabilidade aliada à reciclagem de resíduos da construção civil	35
1.5. Objetivo da pesquisa.....	40
1.5.1. Objetivo geral	40
1.5.2. Objetivos específicos.....	40
1.6. Justificativas	41
1.7. Contextualização no programa	41
1.8. Estratégia	42
1.8.1. Unidade de análise.....	42
1.8.2. Delimitação do trabalho	42
1.8.3. Método de análise de dados.....	42
1.9. Organização do trabalho	42
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	44
2.1. Gestão de resíduos de construção civil.....	44
2.1.1. Situação Internacional.....	45
2.1.2. Situação Nacional.....	53
2.2. Processos para a reciclagem dos resíduos de construção civil	62
2.2.1. Britadores de impacto	62
2.2.2. Britador de mandíbula	64
2.2.3. Britadores móveis	65
2.3. Normatização acerca da utilização de resíduos da construção civil na pavimentação	65
2.3.1. Normatização Internacional.....	66
2.3.2. Normatização nacional	67
2.3.2.1. Manual de pavimentação	67
2.3.2.2. Associação Brasileira de Normas Técnicas	69
2.3.2.3. Resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA	70

2.4. Uso de agregado reciclado em pavimentação	71
2.4.1. Classificação e requisitos para utilização dos agregados reciclados de acordo com as normas brasileiras	73
2.4.1.1. Classificação de acordo com a resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA	73
2.4.1.2. Classificação de acordo com a norma ABNT NBR 15116:2004.....	75
2.4.1.3. Requisitos previstos na norma ABNT NBR 15116:2004.....	75
2.4.2. Aplicação de agregado reciclado de resíduos de construção civil em bases e sub-bases de pavimentação – uma prática já consolidada no Brasil e no mundo	77
2.4.2.1. Aplicação internacional	78
2.4.2.2. Aplicação nacional.....	80
2.5. Concreto betuminoso usinado a quente	84
2.5.1. Normatização e requisitos para concretos betuminosos usinados a quente	87
2.5.2. Aplicação de agregado reciclado de resíduos de construção civil em concretos betuminosos usinados a quente.....	90
2.5.2.1. Experiência internacional	91
2.5.2.2. Experiência nacional.....	95
2.6. Propriedades dos agregados reciclados.....	97
2.6.1. Granulometria	98
2.6.2. Desgaste por abrasão Los Angeles	99
2.6.3. Forma dos grãos.....	101
2.6.4. Absorção.....	103
2.6.5. Massa específica aparente.....	104
2.7. Propriedades do concreto betuminoso usinado a quente com agregados reciclados de concreto.....	106
2.7.1. Teor ótimo de ligante	109
2.7.2. Densidade da mistura.....	112
2.7.3. Volume de vazios (Vv)	113
2.7.4. Vazios cheios de betume (VCB)	115
2.7.5. Vazios do agregado mineral (VAM)	116
2.7.6. Fluência Marshall	116
2.7.7. Estabilidade Marshall	116
2.7.8. Módulo de elasticidade	117
2.7.9. Módulo de resiliência (MR).....	117
2.7.10. Resistência à tração.....	119
2.7.11. Vida de fadiga	120
2.7.12. Deformação permanente.....	120

2.7.13. Envelhecimento	121
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	126
3.1. Variáveis do projeto	127
3.2. Ruídos do processo	128
3.3. Fatores controláveis.....	129
3.4. Descrição dos materiais.....	130
3.4.1. Seleção da amostra	130
3.4.2. Ligante.....	130
3.4.3. Agregado miúdo.....	130
3.4.4. Agregado graúdo.....	131
3.5. Caracterização dos materiais	132
3.5.1. Ligante.....	132
3.5.2. Agregado miúdo.....	134
3.5.3. Agregado graúdo.....	135
3.6. Definição da composição granulométrica teórica das misturas asfálticas	140
3.7. Determinação dos teores ótimos de ligante	142
3.7.1. Método de dosagem Marshall (DNER-ME 043:1995)	142
3.7.2. Densidade máxima medida, ensaio RICE (ABNT NBR 15619:2012).....	146
3.7.3. Determinação dos parâmetros gerados na dosagem Marshall	147
3.7.4. Escolha dos teores de ligante para a dosagem Marshall e ensaio RICE	151
3.7.5. Métodos para determinação do teor ótimo de ligante.....	152
3.8. Caracterização mecânica do CBUQ.....	152
3.8.1. Deformação permanente – Simulador de tráfego francês LCPC (NF-P-98-250-2:1997 e NF-P-98-253-1:1993)	153
3.8.2. Resistência da mistura asfáltica compactada ao dano por umidade – Ensaio Lottman (AASHTO T283:1989)	158
3.9. Corpos de prova estudados nesse trabalho	163
3.10. Alvo desejado para as propriedades mecânicas estudadas	165
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	166
4.1. Caracterização dos agregados.....	166
4.1.1. Absorção.....	167
4.1.2. Desgaste por abrasão Los Angeles – apenas para Brita 1	167
4.1.3. Massa específica aparente.....	169
4.1.4. Massa específica real.....	170
4.2. Massa específica aparente ponderada das misturas de agregados	171
4.3. Parâmetros volumétricos da dosagem Marshall e ensaio RICE.....	172

4.3.1. Massa específica aparente (GMB)	177
4.3.2. Densidade Máxima Medida (DMM)	178
4.3.3. Relação betume vazios (RBV).....	179
4.3.4. Volume de vazios (Vv)	180
4.3.5. Vazios com betume (VCB).....	181
4.3.6. Vazios do agregado mineral (VAM)	181
4.3.7. Estabilidade	182
4.3.8. Fluência	183
4.3.9. Densidade efetiva do agregado (pef).....	184
4.3.10. Absorção de asfalto por massa de agregado (Aabs)	185
4.3.11. Quantidade de asfalto efetivo na mistura (Aef)	185
4.4. Teores ótimos de ligante	186
4.5. Deformação Permanente (simulador de tráfego francês LCPC)	193
4.6. Resistência da mistura asfáltica compactada ao dano por umidade – Ensaio Lottman	200
4.7. Análise de custo das misturas.....	204
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	210
5.1. Conclusões.....	210
5.2. Sugestões para trabalhos futuros	213
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	215
7. ANEXOS	233
7.1. Análises granulométricas	233
7.1.1. Pó de pedra.....	233
7.1.2. Brita 1.....	233
7.1.3. Pedrisco.....	234
7.2. Análise estatística da absorção e da massa específica real para o pedrisco e brita 1	235
7.2.1. Análise estatística – Absorção – Brita 1	235
7.2.2. Análise estatística – Absorção – Pedrisco	237
7.2.3. Análise estatística – Massa específica real – Brita 1	240
7.2.4. Análise estatística – Massa específica real – Pedrisco	242
7.3. Dados laboratoriais – Deformação Permanente (LCPC).....	245
7.3.1. Traço AN	245
7.3.2. Traço A30G25.....	248
7.3.3. Traço A30G50.....	251
7.3.4. Traço A30G75.....	254
7.3.5. Traço A30G100.....	257

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Matriz comparativa de transportes do Brasil – Cenário para 2025, com base em dados de 2005 (CEBDS, 2012).	18
Figura 1.2 – Comparativo entre percentual de rodovias não pavimentadas e a economia dos dez municípios mais “pobres” do estado do Paraná (adaptado pela autora de IBGE, 2010a).	24
Figura 1.3 – Comparativo entre percentual de rodovias não pavimentadas e o PIB dos dez municípios mais “ricos” do estado do Paraná (adaptado pela autora de IBGE, 2010a e IBGE, 2010b).	25
Figura 1.4 – Classificação do Pavimento – Extensão Total (CNT, 2011).	26
Figura 2.1 – Estimativa de RCD coletada nas diferentes regiões do Brasil (t/dia) (BRASIL, 2011).	55
Figura 2.2 – Participação dos RCD na totalidade dos RSU gerados nos municípios pesquisado (PINTO, 1999).	56
Figura 2.3 – Detalhe de britador de impacto da usina Urbem, em São Bernardo do Campo/SP (MIRANDA, 2011).	63
Figura 2.4 – Detalhe de britador de mandíbula (MIRANDA, 2011).	64
Figura 2.5 – Detalhe de reciclador móvel em operação (SILVA, 2009).	65
Figura 2.6 – Ilustração dos danos causados pela água na mistura (KIM; LUTIF, 2006 apud TORRES et al., 2010).	104
Figura 2.7 – Influência do agregado e do ligante no desempenho do CBUQ (FHWA, 2002 apud WESSELING, 2005).	108
Figura 2.8 – Esquema da interação ligante-agregado para a compensação da heterogeneidade do material (BRANCO, 2004).	110
Figura 2.9 – Vv versus absorção de água (MARINHO, 2011).	114
Figura 3.1 – Fluxograma do programa experimental utilizado nesta pesquisa.	126
Figura 3.2 – Chapa cerâmica utilizada entre a chama e o recipiente de mistura do CAP.	128
Figura 3.3 – Britadores de Mandíbula utilizados nesse trabalho.	131
Figura 3.4 – Curva de viscosidade por temperatura.	133
Figura 3.5 – Temperatura de moldagem igual à 140°C (moldagem dos corpos de prova tipo Marshall).	134
Figura 3.6 – Temperatura de moldagem igual à 140°C (moldagem dos corpos de prova para o ensaio de deformação permanente – simulador de tráfego francês LCPC).	134
Figura 3.7 – Curva granulométrica do agregado miúdo – Pó de pedra.	135
Figura 3.8 – Curva granulométrica do agregado graúdo natural – Brita 1.	136
Figura 3.9 – Curva granulométrica do agregado graúdo natural – Pedrisco.	137
Figura 3.10 – Curva granulométrica das misturas.	140
Figura 3.11 – Redutor de amostras tipo Jones.	141
Figura 3.12 – Adição de ligante aos agregados.	144
Figura 3.13 – Mistura ao fogo, com a utilização da chapa cerâmica.	144
Figura 3.14 – Colocação de 1,2 kg da mistura no molde para compactação.	145
Figura 3.15 – Compactador mecânico utilizado nesta pesquisa.	145
Figura 3.16 – Banho Maria dos corpos de prova a 60°C.	145
Figura 3.17 – Determinação da estabilidade e fluência.	146
Figura 3.18 – Equipamento para determinação da densidade máxima medida utilizado nesta pesquisa.	146
Figura 3.19 – Detalhe da faixa de transição da carga solicitante do simulador sobre a placa e os respectivos pontos de leitura das deformações (BARRA, 2005 apud SILVA, 2009).	154
Figura 3.20 – Separação dos agregados para execução do ensaio deformação permanente (simulador de tráfego francês LCPC).	155
Figura 3.21 – Misturador mecânico utilizado nesta pesquisa.	155
Figura 3.22 – Pesagem do ligante.	156
Figura 3.23 – Vista interna do misturador mecânico já com os agregados e ligante.	156
Figura 3.24 – Retirada do material para moldagem dos corpos de prova.	156
Figura 3.25 – Moldagem dos corpos de prova.	157
Figura 3.26 – Moldagem dos corpos de prova.	157
Figura 3.27 – Ensaio de deformação permanente (simulador de tráfego francês LCPC).	157
Figura 3.28 – Medição da deformação em diversos pontos dos corpos de prova.	158

Figura 3.29 – Representação esquemática da AASTHO T283:1989 (KIM; LUTIF, 2006 apud TORRES et al., 2010).	158
Figura 3.30 – Separação dos agregados para execução do ensaio de resistência da mistura asfáltica compactada ao dano por umidade (ensaio Lottman).	160
Figura 3.31 – Moldagem dos corpos de prova.	160
Figura 3.32 – Saturação à vácuo dos corpos de prova.	161
Figura 3.33 – Saturação à vácuo dos corpos de prova.	161
Figura 3.34 – Aplicação de filme plástico nos corpos de prova.	161
Figura 3.35 – Congelamento dos corpos de prova.	162
Figura 3.36 – Banho à 60°C dos corpos de prova.	162
Figura 3.37 – Rompimento dos corpos de prova saturados.	162
Figura 3.38 – Rompimento dos corpos de prova secos.	163
Figura 3.39 – Corpos de prova para a dosagem Marshall.	164
Figura 3.40 – Corpos de prova para o ensaio de deformação permanente (simulador de tráfego francês LCPC).	164
Figura 3.41 – Corpos de prova separados para a saturação do ensaio de resistência da mistura asfáltica compactada ao dano por umidade (ensaio Lottman).	164
Figura 4.1 – Abrasão Los Angeles x absorção – BRITA 1.	168
Figura 4.2 – Abrasão Los Angeles x resistência à compressão do concreto – BRITA 1.	169
Figura 4.3 – Massa específica aparente x absorção de água – BRITA 1.	169
Figura 4.4 – Massa específica aparente x absorção de água – PEDRISCO.	170
Figura 4.5 – Massa específica aparente ponderada das misturas de agregados.	171
Figura 4.6 – Curvas de GMB por teor de ligante.	178
Figura 4.7 - Curvas de DMM por teor de ligante.	179
Figura 4.8 - Curvas de RBV por teor de ligante.	179
Figura 4.9 - Curvas de VV por teor de ligante.	180
Figura 4.10 - Curvas de VCB por teor de ligante.	181
Figura 4.11 – Curvas de VAM por teor de ligante.	182
Figura 4.12 - Curvas de estabilidade por teor de ligante.	182
Figura 4.13 - Curvas de fluência por teor de ligante.	183
Figura 4.14 - Curvas de pef por teor de ligante.	184
Figura 4.15 - Curvas de Aabs por teor de ligante.	185
Figura 4.16 - Curvas de Aef por teor de ligante.	186
Figura 4.17 – Vv x RBV x teor de ligante – AN.	187
Figura 4.18 – Vv x RBV x teor de ligante – A30G25.	188
Figura 4.19 – Vv x RBV x teor de ligante – A30G50.	188
Figura 4.20 – Vv x RBV x teor de ligante – A30G75.	189
Figura 4.21 – Vv x RBV x teor de ligante – A30G100.	189
Figura 4.22 – Teor ótimo de ligante por teor de substituição por ARCg.	193
Figura 4.23 – Número de ciclos x afundamento – Traço AN.	194
Figura 4.24 – Número de ciclos x afundamento – Traço A30G25.	194
Figura 4.25 – Número de ciclos x afundamento – Traço A30G50.	195
Figura 4.26 – Número de ciclos x afundamento – Traço A30G75.	195
Figura 4.27 – Número de ciclos x afundamento – Traço A30G100.	196
Figura 4.28 – Afundamento do trilho de roda x número de ciclos.	198
Figura 4.29 – Afundamento do trilho de roda x número de ciclos – comparação entre o trabalho de Silva (2009) e o traço A30G100.	199
Figura 4.30 – Detalhe de corpo de prova saturado do ensaio Lottman rompido – agregados miúdos não aderidos.	201
Figura 4.31 – Detalhe de corpo de prova seco do ensaio Lottman rompido, traço A30G100.	202
Figura 4.32 – Detalhe de corpo de prova seco do ensaio Lottman rompido, traço AN.	202
Figura 4.33 – Detalhe de corpo de prova saturado do ensaio Lottman rompido, traço A30G100.	203
Figura 4.34 – Detalhe de corpo de prova saturado do ensaio Lottman rompido, traço AN.	203
Figura 7.1 – Absorção – Brita 1.	237
Figura 7.2 – Absorção – Pedrisco.	239
Figura 7.3 – Massa específica real – Brita 1.	242
Figura 7.4 – Massa específica real – Pedrisco.	244

LISTA DE EQUAÇÕES

<i>Equação 3.1 – Equação da curva de viscosidade por temperatura.</i>	133
<i>Equação 3.2 – Densidade máxima teórica (DMT) em g/cm³.</i>	147
<i>Equação 3.3 – Densidade máxima medida (DMM) em g/cm³.</i>	148
<i>Equação 3.4 – Volume dos corpos de prova (V) em cm³.</i>	148
<i>Equação 3.5 – Massa específica aparente da mistura (Gmb) em g/cm³.</i>	149
<i>Equação 3.6 – Volume de vazios (Vv) em %.</i>	149
<i>Equação 3.7 – Vazios com betume (VCB) em %.</i>	149
<i>Equação 3.8 – Vazios do agregado mineral (VAM) em %.</i>	149
<i>Equação 3.9 – Relação betume/vazios (RBV) em %.</i>	150
<i>Equação 3.10 – Densidade efetiva do agregado (ρ_{ef}) em g/cm³.</i>	150
<i>Equação 3.11 – Absorção de asfalto (Aabs) em %.</i>	150
<i>Equação 3.12 – Quantidade de asfalto efetivo na mistura (Aef) em %.</i>	150
<i>Equação 3.13 – Afundamento na trilha de rodas a N ciclos ($\dot{A}tr_N$) em %.</i>	154
<i>Equação 3.14 – relação entre RC e RSC (RRT) em %.</i>	159
<i>Equação 4.1 – Polinômio do quarto grau da curva Vv – Traço A30G100.</i>	187
<i>Equação 4.2 – Polinômio do quarto grau da curva RBV – Traço A30G100.</i>	187

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1.1 – Variação Interanual na ocupação por principais setores de atividade, em % (IPEA, 2007).</i>	16
<i>Tabela 1.2 – Resumo da malha rodoviária do Paraná em novembro de 2011 (IPARDES, 2011).</i>	19
<i>Tabela 1.3 – Comparativo da redução do tempo gasto em viagens (AUGE, 2008 apud OLIVEIRA, 2010).</i>	23
<i>Tabela 1.4 – Comparativo entre percentual de rodovias não pavimentadas e a economia dos dez municípios mais “pobres” do estado do Paraná (adaptado pela autora de IBGE, 2010a).</i>	24
<i>Tabela 1.5 – Comparativo entre percentual de rodovias não pavimentadas e o PIB dos dez municípios mais “ricos” do estado do Paraná (Adaptado pela autora de IBGE, 2010a e IBGE, 2010b).</i>	25
<i>Tabela 1.6 – Classificação do Pavimento (CNT, 2011).</i>	26
<i>Tabela 2.1 – Resumo da geração estimada de RCD nos EUA em 1996 (REPORT N° EPA530-R-98-010, 1998 apud FERNANDES, 2004).</i>	47
<i>Tabela 2.2 – A cadeia de negócios gerada pela gestão diferenciada e reciclagem de RCD na Bélgica (1) – (PINTO, 1999).</i>	49
<i>Tabela 2.3 – Participação dos RCD nos RSU e taxa de geração em localidades diversas (PINTO, 1999).</i>	50
<i>Tabela 2.4 – Gestão de RCD na Comunidade Europeia comparativamente aos valores praticados em São Paulo. Custos e preços em Euro/t (1)(2) (PINTO, 1999).</i>	50
<i>Tabela 2.5 – Quantidade de usinas de RCD na Europa segundo Quebaud. (AFFONSO, 2005).</i>	51
<i>Tabela 2.6 – Reaproveitamento de RCD em alguns países (MOTTA E FERNANDES, 2003 apud AFFONSO, 2005).</i>	52
<i>Tabela 2.7 – Estimativas de geração de resíduos de construção civil (JOHN; AGOPYAN, 2000).</i>	52
<i>Tabela 2.8 – Produção de RCD em algumas cidades brasileiras (AFFONSO, 2005).</i>	54
<i>Tabela 2.9 – Geração estimada de entulho produzidos no país e no exterior (ZORDAN, 1997).</i>	54
<i>Tabela 2.10 – Composição dos RSU nos municípios pesquisados (PINTO, 1999).</i>	56
<i>Tabela 2.11 – Participação dos RCD nos RSU e taxa de geração em localidades diversas (PINTO, 1999).</i>	57
<i>Tabela 2.12 – Classificação dos municípios brasileiros de acordo com a geração de RCD pela população urbana (JOHN; AGOPYAN, 2000).</i>	58
<i>Tabela 2.13 – Distribuição da ocorrência de vetores em áreas com descarte de RCD em São José do Rio Preto (PINTO, 1999).</i>	58
<i>Tabela 2.14 – Composição média da fração mineral do entulho (%) (ZORDAN, 1999).</i>	59
<i>Tabela 2.15 – Usinas de reciclagem implantadas no Brasil até novembro de 2008 (MIRANDA et al., 2009).</i>	60
<i>Tabela 2.16 – Requisitos gerais para agregado reciclado destinado a pavimentação, conforme a norma ABNT NBR 15116:2004.</i>	76
<i>Tabela 2.17 – Requisitos específicos para agregado reciclado destinado a pavimentação, conforme a norma ABNT NBR 15116:2004.</i>	76
<i>Tabela 2.18 – Requisitos para agregado reciclado destinado ao preparo de concreto sem função estrutural, conforme a norma ABNT NBR 15116:2004.</i>	77
<i>Tabela 2.19 – Normas nacionais para utilização de agregado em CBUQ (Adaptado pela autora de DNIT-ES 031:2006).</i>	88
<i>Tabela 2.20 – Faixas granulométricas do concreto asfáltico (DNIT-ES 031:2006).</i>	88
<i>Tabela 2.21 – Ensaio nacionais para determinação da tenacidade e resistência à abrasão (BERNUCCI et al., 2006).</i>	89
<i>Tabela 2.22 – Normas internacionais para utilização de agregado em CBUQ (Adaptado pela autora de WEN; BHUSAL, 2011).</i>	89
<i>Tabela 2.23 – Comparativo entre os resultados de diferentes pesquisas com agregados reciclados de concreto (autora, 2013).</i>	105
<i>Tabela 2.24 – Variáveis que afetam as propriedades da mistura (MONISMITH et al., 1989 apud WESSELING, 2005).</i>	107
<i>Tabela 2.25 – Resultados de pesquisas anteriores (autora, 2013).</i>	122
<i>Tabela 2.26 – Variações das propriedades – CBUQ com agregado natural substituído por ARC (autora, 2013).</i>	125
<i>Tabela 3.1 – Demanda de qualidade.</i>	127

Tabela 3.2 – Características convencionais do CAP 50/70 (Fonte: Laboratório Un-Repar/OT/QP – Araucária-PR).	132
Tabela 3.3 – Propriedades, normas e resultados do agregado miúdo.	135
Tabela 3.4 – Propriedades, normas e resultados dos agregados graúdos naturais e reciclados tipo Brita 1.	136
Tabela 3.5 – Propriedades, normas e resultados dos agregados graúdos naturais e reciclados tipo Pedrisco.	137
Tabela 3.6 – Absorção e massa específica real para os agregados reciclados de concreto – Brita 1.	138
Tabela 3.7 – Absorção e massa específica real para os agregados reciclados de concreto – Pedrisco.	138
Tabela 3.8 – Resumo das propriedades de absorção e massa específica real para os agregados reciclados de concreto.	139
Tabela 3.9 – Proporções dos agregados.	139
Tabela 3.10 – Composição granulométrica das misturas.	140
Tabela 3.11 – Composição dos agregados nas misturas.	141
Tabela 3.12 – Requisitos de dosagem de concreto asfáltico (DNIT-ES 031:2006).	144
Tabela 3.13 – Quantidade de corpos de prova estudados nesta pesquisa.	163
Tabela 3.14 – Quantidade de agregados e ligante utilizados na pesquisa.	165
Tabela 3.15 – Alvo desejado para as propriedades mecânicas estudadas.	165
Tabela 4.1 – Resumo das propriedades e resultados dos agregados graúdos naturais e reciclados tipo Brita 1.	166
Tabela 4.2 – Resumo das propriedades e resultados dos agregados graúdos naturais e reciclados tipo Pedrisco.	166
Tabela 4.3 – Absorção.	167
Tabela 4.4 – Massa específica aparente x massa específica real – BRITA 1.	171
Tabela 4.5 – Massa específica aparente x massa específica real – PEDRISCO.	171
Tabela 4.6 – Parâmetros da dosagem Marshall e ensaio RICE para o traço AN.	172
Tabela 4.7 – Parâmetros da dosagem Marshall e ensaio RICE para o traço A30G25.	173
Tabela 4.8 – Parâmetros da dosagem Marshall e ensaio RICE para o traço A30G50.	174
Tabela 4.9 – Parâmetros da dosagem Marshall e ensaio RICE para o traço A30G75.	175
Tabela 4.10 – Parâmetros da dosagem Marshall e ensaio RICE para o traço A30G100.	177
Tabela 4.11 – Teores ótimos de ligante pelos três diferentes métodos.	189
Tabela 4.12 – Resumo dos teores ótimos de ligante pelos três diferentes métodos.	190
Tabela 4.13 – Vv e RBV para os teores ótimos calculados de acordo com o método de Vv de 4%.	191
Tabela 4.14 – Vv e RBV para os teores ótimos calculados de acordo com o método Média das máximas: Estabilidade, Massa específica aparente e Vv de 4%.	191
Tabela 4.15 – Vv e RBV para os teores ótimos calculados de acordo com o método Vv e RBV: teores centrais.	192
Tabela 4.16 – Teores ótimos de ligante.	192
Tabela 4.17 – Afundamento do trilho de roda x número de ciclos.	197
Tabela 4.18 – Afundamento do trilho de roda x número de ciclos – comparação entre o trabalho de Silva (2009) e o traço A30G100.	198
Tabela 4.19 – Resultados obtidos para o ensaio Lottman.	200
Tabela 4.20 – Resultados obtidos para a repetição do ensaio Lottman.	201
Tabela 4.21 – Massa unitária dos agregados miúdos e reciclados (adaptado pela autora de CARNEIRO et al., 2001).	204
Tabela 4.22 – Custos dos agregados naturais, obtidos pela autora da pedreira Raphael F. Greca, em Curitiba/PR.	205
Tabela 4.23 – Custos dos agregados reciclados de concreto, obtidos pela autora da USIPAR, em Curitiba/PR.	205
Tabela 4.24 – Custo do CAP 50/70, obtido pela autora da CBB Asfaltos, em Curitiba/PR.	205
Tabela 4.25 – Custo unitário de referência - 5 S 02 540 01 - Concreto betuminoso usinado a quente - capa de rolamento (adaptado pela autora de DNIT, 2012).	206
Tabela 4.26 – Custo das misturas.	207
Tabela 4.27 – Comparação da análise de custos dessa pesquisa com a análise de custos da pesquisa de Guimarães e Ribeiro (2005).	208

<i>Tabela 4.28 – Toneladas de camada de CBUQ para camadas de rolamento que seriam executadas com dois milhões de reais.</i>	209
<i>Tabela 7.1 – Análise granulométrica – Pó de pedra.</i>	233
<i>Tabela 7.2 – Análise Granulométrica – Brita 1.</i>	233
<i>Tabela 7.3 – Análise Granulométrica – pedrisco – agregado natural.</i>	234
<i>Tabela 7.4 – Absorção – Brita 1.</i>	235
<i>Tabela 7.5 – Tabela ANOVA - Absorção – Brita 1.</i>	235
<i>Tabela 7.6 – Ordenação das médias em ordem crescente - Absorção – Brita 1.</i>	236
<i>Tabela 7.7 – Absorção – Brita 1.</i>	236
<i>Tabela 7.8 – Absorção – Pedrisco.</i>	237
<i>Tabela 7.9 – Tabela ANOVA - Absorção – Pedrisco.</i>	238
<i>Tabela 7.10 – Ordenação das médias em ordem crescente - Absorção – Pedrisco.</i>	238
<i>Tabela 7.11 – Absorção – Pedrisco.</i>	239
<i>Tabela 7.12 – Massa específica real – Brita 1.</i>	240
<i>Tabela 7.13 – Tabela ANOVA - Absorção – Pedrisco.</i>	240
<i>Tabela 7.14 – Ordenação das médias em ordem crescente – Massa Específica Real – Brita 1.</i>	241
<i>Tabela 7.15 – Massa específica real – Brita 1.</i>	241
<i>Tabela 7.16 – Massa específica real – Pedrisco.</i>	242
<i>Tabela 7.17 – Tabela ANOVA – Massa específica real – Pedrisco.</i>	243
<i>Tabela 7.18 – Ordenação das médias em ordem crescente – Massa Específica Real – Pedrisco.</i>	243
<i>Tabela 7.19 – Massa específica real – Pedrisco.</i>	244
<i>Tabela 7.20 – Leitura inicial – Lado Esquerdo – Traço AN.</i>	245
<i>Tabela 7.21 – Leitura 100 ciclos – Lado Esquerdo – Traço AN.</i>	245
<i>Tabela 7.22 – Leitura 300 ciclos – Lado Esquerdo – Traço AN.</i>	245
<i>Tabela 7.23 – Leitura 1000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço AN.</i>	246
<i>Tabela 7.24 – Leitura 3000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço AN.</i>	246
<i>Tabela 7.25 – Leitura 10000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço AN.</i>	246
<i>Tabela 7.26 – Leitura 30000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço AN.</i>	246
<i>Tabela 7.27 – Leitura inicial – Lado Direito – Traço AN.</i>	246
<i>Tabela 7.28 – Leitura 100 ciclos – Lado Direito – Traço AN.</i>	247
<i>Tabela 7.29 – Leitura 300 ciclos – Lado Direito – Traço AN.</i>	247
<i>Tabela 7.30 – Leitura 1000 ciclos – Lado Direito – Traço AN.</i>	247
<i>Tabela 7.31 – Leitura 3000 ciclos – Lado Direito – Traço AN.</i>	247
<i>Tabela 7.32 – Leitura 10000 ciclos – Lado Direito – Traço AN.</i>	247
<i>Tabela 7.33 – Leitura 30000 ciclos – Lado Direito – Traço AN.</i>	248
<i>Tabela 7.34 – Leitura inicial – Lado Esquerdo – Traço A30G25.</i>	248
<i>Tabela 7.35 – Leitura 100 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G25.</i>	248
<i>Tabela 7.36 – Leitura 300 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G25.</i>	248
<i>Tabela 7.37 – Leitura 1000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G25.</i>	249
<i>Tabela 7.38 – Leitura 3000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G25.</i>	249
<i>Tabela 7.39 – Leitura 10000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G25.</i>	249
<i>Tabela 7.40 – Leitura 30000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G25.</i>	249
<i>Tabela 7.41 – Leitura inicial – Lado Direito – Traço A30G25.</i>	249
<i>Tabela 7.42 – Leitura 100 ciclos – Lado Direito – Traço A30G25.</i>	250
<i>Tabela 7.43 – Leitura 300 ciclos – Lado Direito – Traço A30G25.</i>	250
<i>Tabela 7.44 – Leitura 1000 ciclos – Lado Direito – Traço A30G25.</i>	250
<i>Tabela 7.45 – Leitura 3000 ciclos – Lado Direito – Traço A30G25.</i>	250
<i>Tabela 7.46 – Leitura 10000 ciclos – Lado Direito – Traço A30G25.</i>	250
<i>Tabela 7.47 – Leitura 30000 ciclos – Lado Direito – Traço A30G25.</i>	251
<i>Tabela 7.48 – Leitura inicial – Lado Esquerdo – Traço A30G50.</i>	251
<i>Tabela 7.49 – Leitura 100 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G50.</i>	251
<i>Tabela 7.50 – Leitura 300 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G50.</i>	251
<i>Tabela 7.51 – Leitura 1000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G50.</i>	252
<i>Tabela 7.52 – Leitura 3000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G50.</i>	252
<i>Tabela 7.53 – Leitura 10000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G50.</i>	252
<i>Tabela 7.54 – Leitura 30000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G50.</i>	252
<i>Tabela 7.55 – Leitura inicial – Lado Direito – Traço A30G50.</i>	252

Tabela 7.56 – Leitura 100 ciclos – Lado Direito – Traço A30G50.	253
Tabela 7.57 – Leitura 300 ciclos – Lado Direito – Traço A30G50.	253
Tabela 7.58 – Leitura 1000 ciclos – Lado Direito – Traço A30G50.	253
Tabela 7.59 – Leitura 3000 ciclos – Lado Direito – Traço A30G50.	253
Tabela 7.60 – Leitura 10000 ciclos – Lado Direito – Traço A30G50.	253
Tabela 7.61 – Leitura 30000 ciclos – Lado Direito – Traço A30G50.	254
Tabela 7.62 – Leitura inicial – Lado Esquerdo – Traço A30G75.	254
Tabela 7.63 – Leitura 100 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G75.	254
Tabela 7.64 – Leitura 300 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G75.	254
Tabela 7.65 – Leitura 1000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G75.	255
Tabela 7.66 – Leitura 3000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G75.	255
Tabela 7.67 – Leitura 10000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G75.	255
Tabela 7.68 – Leitura 30000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G75.	255
Tabela 7.69 – Leitura inicial – Lado Direito – Traço A30G75.	255
Tabela 7.70 – Leitura 100 ciclos – Lado Direito – Traço A30G75.	256
Tabela 7.71 – Leitura 300 ciclos – Lado Direito – Traço A30G75.	256
Tabela 7.72 – Leitura 1000 ciclos – Lado Direito – Traço A30G75.	256
Tabela 7.73 – Leitura 3000 ciclos – Lado Direito – Traço A30G75.	256
Tabela 7.74 – Leitura 10000 ciclos – Lado Direito – Traço A30G75.	256
Tabela 7.75 – Leitura 30000 ciclos – Lado Direito – Traço A30G75.	257
Tabela 7.76 – Leitura inicial – Lado Esquerdo – Traço A30G100.	257
Tabela 7.77 – Leitura 100 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G100.	257
Tabela 7.78 – Leitura 300 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G100.	257
Tabela 7.79 – Leitura 1000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G100.	258
Tabela 7.80 – Leitura 3000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G100.	258
Tabela 7.81 – Leitura 10000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G100.	258
Tabela 7.82 – Leitura 30000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G100.	258
Tabela 7.83 – Leitura inicial – Lado Direito – Traço A30G100.	258
Tabela 7.84 – Leitura 100 ciclos – Lado Direito – Traço A30G100.	259
Tabela 7.85 – Leitura 300 ciclos – Lado Direito – Traço A30G100.	259
Tabela 7.86 – Leitura 1000 ciclos – Lado Direito – Traço A30G100.	259
Tabela 7.87 – Leitura 3000 ciclos – Lado Direito – Traço A30G100.	259
Tabela 7.88 – Leitura 10000 ciclos – Lado Direito – Traço A30G100.	259
Tabela 7.89 – Leitura 30000 ciclos – Lado Direito – Traço A30G100.	260

LISTA DE SIGLAS

µm – Micrômetros

A20 – Agregado Graúdo Reciclado de Concreto originado de concreto com 20 MPa de resistência à compressão

A30 – Agregado Graúdo Reciclado de Concreto originado de concreto com 30 MPa de resistência à compressão

A40 – Agregado Graúdo Reciclado de Concreto originado de concreto com 40 MPa de resistência à compressão

AAMAS – Asphalt-Aggregate Mixtures Analysis System

AASTHO – American Association of State Highway and Transportation Officials

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ALT-MAT – Alternative Materials in Road Construction

AN – Agregado Natural

ANEPAC – Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil

ANOVA – Análise de Variância

ANP – Agência Nacional do Petróleo

APA – Analisador de Pavimento Asfáltico

ARC – Agregado Reciclado de Concreto

ARCg – Agregado Graúdo Reciclado de Concreto

ARM – Agregado de Resíduos Misto

ASTM – American Society for Testing and Materials

ATR – Afundamentos nas Trilhas de Rodas

AUS-SPEC – Development Specifications

BA – Bahia

BH – Belo Horizonte

Bric – Brasil, Rússia, Índia e China

BS – British Standards

CA – Coarse Aggregate

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CBIC – Câmara Brasileira da Indústria da Construção

CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente

CCR – Concreto Compactado a Rolo

CEBDS – Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável

CEC – Community European Committee

CIB – Conselho Internacional para a Pesquisa e Inovação em Construção

cm – Centímetro

CNT – Conselho Nacional de Transporte

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

Cu – Coeficiente de Umidade

DER/MG – Departamento de Estradas e Rodagem do Estado de Minas Gerais

DER/PR – Departamento de Estradas e Rodagem do Estado do Paraná

DMM – Densidade Máxima Medida

DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre
DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral
DRX – Difração de Raios-X
E – Estabilidade Marshall
E – Resistência ao Esmagamento de Agregados Graúdos
EB – Especificação Brasileira
EC – European Community
EIA – Estudo de Impacto Ambiental
EPA – Agência de Proteção Ambiental dos EUA
EPIA – Estudo Prévio de Impacto Ambiental
ES – Especificação de Serviço
EUA – Estados Unidos da América
F – Fluência
FA – Fine Aggregate
FDOT – Florida Department of Transportation
FDU – Fundo de Desenvolvimento Urbano
FHWA – Federal Highway Administration
FIPE – Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas
g – Gramas
GMB – Massa Específica Aparente
h – Horas
HAB – Habitante
IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDM – Índice de Degradação de Rochas após a Compactação Marshall, sem Ligante
IDML – Índice de Degradação de Rochas após a Compactação Marshall, com Ligante
IDP – Índice de Degradação após Compactação Proctor
IDW – Índice de Degradação Washington
IPARDES – Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social
IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IPPUC – Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba
ISC – Índice Suporte California
IVBR – Internationale Vereinigung Baustoff – Recycling
SEM – Scanning Electron Microscope
kg – Quilogramas
kgf – Quilogramas-Força
km – quilômetros
kN – Quilo-Newtons
LA – Abrasão Los Angeles
LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
LAMP – Laboratório de Pavimentação Professor Armando Martins Pereira
LCPC – Laboratoire Central des Ponts Chaussées

LIMPURB – Empresa de Limpeza Urbana de Salvador
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LTDA. – Limitada
LUBNOR – Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste
m – Metro
ME – Método de Ensaio
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
MG – Minas Gerais
mm – Milímetros
Mn/DOT - Minnesota Department of Transportation
MPa – Mega Pascal
MR – Módulo de resiliência
N – Número de ciclos
NBR – Norma Brasileira
NESP – Não Espuma
NM – Norma Mercosul
°C – graus Celsius
OECD – Organization for Economic Co-operation and Development
PAC – Plano de Aceleração do Crescimento
PE – Pernambuco
PGRCC – Projeto de Gerenciamento de Resíduo de Construção Civil
PIB – Produto Interno Bruto
PMSP – Prefeitura Municipal de São Paulo
PNLT – Plano Nacional de Logística e Transporte
PNMC – Política Nacional de Mudança de Clima
PNV – Plano Nacional de Viação
PPGECC – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil
PR – Paraná
PROACESSO – Programa de Pavimentação de Ligações e Acessos Rodoviários aos Municípios
PROCIMM – Programa de Pós Graduação em Ciência, Inovação e Modelagem em Materiais
RBV – Relação Betume Vazios
RCA – Recycled Coarse Aggregate
RCD – Resíduos de Construção e Demolição
RCRA – Resource Conservation and Recovering Act
REPAR – Refinaria Presidente Getúlio Vargas da Petrobrás
RIMA – Relatório de Impacto ao Meio Ambiente
RSU – Resíduos Sólidos Urbanos
RT – Resistência à Tração por Compressão Diametral
RTA – Rewriting Techniques and Applications
RTFOT – Rolling Thin Film Oven Test
S/A – Sociedade Anônima
SEIL-PR – Secretaria de Infraestrutura e Logística do Estado do Paraná

SHRP – Strategic Highway Research Program
SISNAMA – Sistema Nacional do Meio Ambiente
SLU – Superintendência de Limpeza Urbana
SP – São Paulo
SRE – Sistema Rodoviário Estadual
SS – Steel Slag
SSS – Saturado Superfície Seca
Superpave – Superior Performing Asphalt Pavements
T – Perda ao Choque no Aparelho de Treton
t – Toneladas
TRE – Tribunal Regional Eleitoral
tf – Toneladas-Força
TL RC-TOB – Technischen Lieferbedingungen für Recycling Baustoffe in
Tragschichten ohne Bindemittel
UFPR – Universidade Federal do Paraná
USP – Universidade de São Paulo
VCB – Vazios Cheios de Betume
VAM – Vazios do Agregado Mineral
Vv – Volume de Vazios
WBCSD – World Business Council for Sustainable Development
WSDOT – Washington State Department of Transportation
XRF - X – Ray Fluorescence Spectrometry

1. INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo inicial é apresentada uma visão geral sobre a importância da construção civil no Brasil, o panorama atual das rodovias no Brasil e a importância da sustentabilidade aliada à reciclagem de resíduos da construção civil. Os subitens deste primeiro capítulo citam o problema e a relevância da pesquisa, os objetivos, a justificativa do estudo, a contextualização no programa, as estratégias e a organização do trabalho.

1.1. A importância da construção civil no Brasil

A importância do setor da construção civil para o Brasil é, de fato, notável e se comprova através de dados do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA, em seu Boletim de Conjuntura nº 78 de setembro de 2007, que aponta um incremento nas vagas de emprego igual a 6,3% apenas no mês de julho de 2007, conforme Tabela 1.1, que se deve ao Plano de Aceleração do Crescimento (PAC), lançado em 28 de janeiro de 2007, e à expansão do mercado imobiliário. Apesar de um crescimento elevado pontualmente observado no mês e ano citados anteriormente, a construção civil registra números positivos em seu mercado de trabalho desde 2004 (CBIC, 2011).

Tabela 1.1 – Variação Interanual na ocupação por principais setores de atividade, em % (IPEA, 2007).

	Indústria	Construção civil	Comércio	Serviços a empresas	Adm. pública	Serviços domésticos	Outros serviços	Outras ativ.	Total
Peso (1)	17,0	7,4	19,4	15,0	15,9	8,4	16,3	0,6	100
2º trim./ 2006	-0,8	0,1	0,8	6,3	1,3	-0,6	1,2	1,3	1,3
Jul./ 2006	1,6	4,5	1,1	6,3	3,1	0,7	0,2	-15,1	2,1
3º trim./ 2006	1,1	3,5	2,3	4,1	3,0	3,1	3,1	-3,9	2,7
4º trim./ 2006	2,0	1,3	2,8	4,0	0,9	4,0	4,4	5,2	2,8
1º trim./ 2007	0,4	3,0	1,3	6,3	1,4	3,8	4,3	9,6	2,8
2º trim./ 2007	1,8	4,0	2,2	9,2	-0,3	6,0	1,7	2,2	3,1
Jul./ 2007	-0,2	6,3	2,3	9,6	2,9	3,3	-0,5	13,4	3,0

(1) Peso referente a junho de 2007.

De acordo com a Câmara Brasileira da Indústria da Construção – CBIC (2011), esse setor continua sendo um dos motores do crescimento do país, sendo

1. INTRODUÇÃO

que o PIB da Construção Civil em 2010 foi de aproximadamente R\$ 165 bilhões de reais, correspondendo a 5,3% do PIB total do Brasil e empregando, até outubro de 2011, 2.848.648 trabalhadores com carteira assinada nesse setor. Além das vagas diretas, o setor também gera empregos indiretos que de acordo com a Câmara Brasileira da Indústria da Construção – CBIC (1998), para cada R\$ 1,0 bilhão a mais, na demanda final da construção, são gerados 176.765 empregos na economia, sendo 34.081 diretos e, portanto, 142.864 empregos indiretos.

Porém, uma pesquisa realizada pelo WBCSD, aponta o setor da construção civil como responsável, no mundo, por 40% da energia consumida e por 35% das emissões de carbono, por isso, investir em novas alternativas que promovam a ecoeficiência é fundamental para diminuir os impactos dessa atividade (CEDBS, 2010).

Outro fato de fundamental importância é que, além de modificar paisagens devido à exploração de recursos naturais, o setor se apresenta como um grande gerador de impacto ambiental (LEVY, 2001; PINTO, 1999; JOHN, 2000).

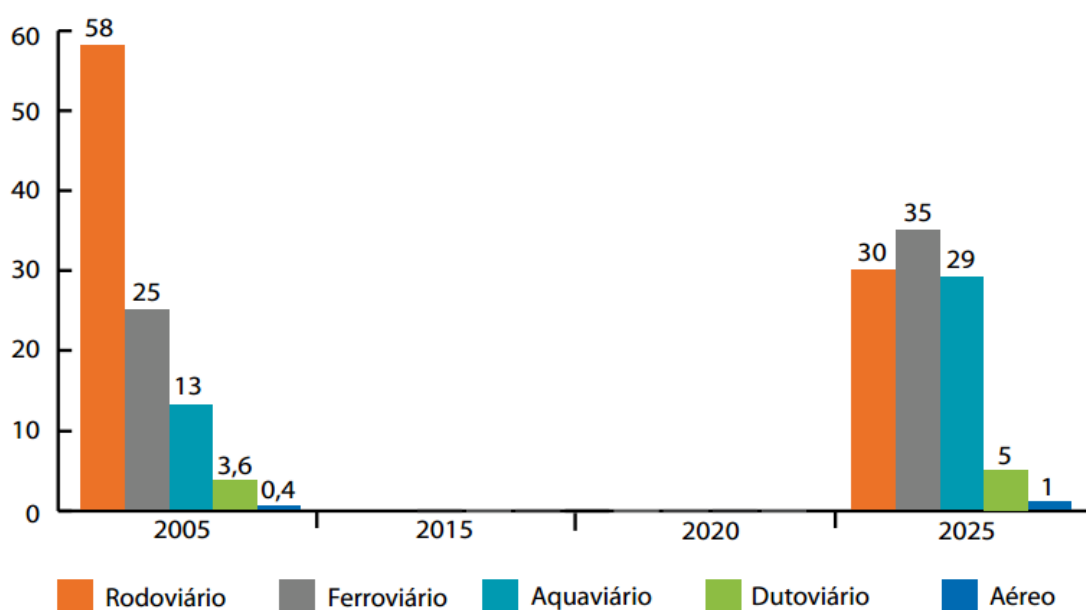
1.2. O panorama atual das rodovias no Brasil

As obras de pavimentação rodoviária cresceram notoriamente a partir dos anos 50, quando, em função de iniciativas de técnicos do antigo DNER, houve maciça transferência de tecnologia dos Estados Unidos da América, graças ao intercâmbio entre Brasil e Estados Unidos nessa área (BRASIL, 2006). Além disso, o modelo rodoviário de escoamento de produção e transporte de carga e de passageiro se deu em função do legado do presidente Washington Luiz, que induziu o uso do automóvel e o acesso a ele, proporcionando o eixo principal de desenvolvimento do país a partir da construção de rodovias, fato que estimulou o crescimento da indústria automobilística, moldou cidades, gerou metrópoles e rasgou estradas por todo o Brasil (CEBDS, 2012).

Existe uma expectativa para o Brasil, de acordo com a Visão Brasil 2050, elaborada pelo Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável – CEBDS (2012), em consonância com o Plano Nacional de Logística e Transporte (PNLT) e a Política Nacional de Mudança de Clima (PNMC) e tendo em vista a necessidade de redução do volume de frete transportado por rodovias e de investir

1. INTRODUÇÃO

em modais de transporte mais eficientes, do ponto de vista energético e ambiental, de previsão, para um horizonte de tempo de 15 a 20 anos, na alteração da participação do modal rodoviário de 58% para 33%, concomitantemente ao acréscimo da participação dos modais ferroviários, de 25% para 32%, do aquaviário, de 13% para 29%, além do dutoviário e aéreo que chegariam a 5% e 1%, respectivamente, de acordo com a Figura 1.1. Caso leve-se em consideração dados mais atuais apresentados no Boletim Estatístico CNT (2012), a realidade dos modais de transporte no Brasil se tornou crítica que os dados de 2005 apresentados na Visão Brasil 2050, do CEBDS, pois, verifica-se que, 61,1% das cargas são transportadas por transporte rodoviário, 20,7% por ferroviário, 13,6% por aquaviário, 4,2% por dutoviário e 0,4% por aéreo.



Fonte: PLNT, MT, 2009.

Figura 1.1 – Matriz comparativa de transportes do Brasil – Cenário para 2025, com base em dados de 2005 (CEBDS, 2012).

Porém, mesmo alterando-se a realidade do modal brasileiro, a defasagem do sistema rodoviário é elevada, no panorama atual das rodovias no Brasil, verifica-se que apenas 13,55% da malha nacional, ou seja, 214.249 km de 1.581.181 km,

1. INTRODUÇÃO

que representam o total da malha rodoviária nacional, são pavimentados, conforme dados do Boletim Estatístico do CNT (2012).

O IPARDES, Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social, apresenta dados da Secretaria de Infraestrutura e Logística, SEIL, do Estado do Paraná, de novembro de 2011, conforme Tabela 1.2. É possível observar que a malha viária do estado do Paraná é composta por 118.587,07 quilômetros, dos quais 102.726,00 são rodovias municipais, 13.876,14 são rodovias estaduais e 1.984,93 de rodovias federais. Das rodovias estaduais, 11.404,25 quilômetros são mantidos pelo DER/PR e 2.471,89 quilômetros são concedidos. É expressiva a quantidade de vias não pavimentadas no estado do Paraná, igual 96.788,97 quilômetros, equivalente a 81,62% da malha total do estado.

*Tabela 1.2 – Resumo da malha rodoviária do Paraná em novembro de 2011
(IPARDES, 2011).*

SITUAÇÃO DAS RODOVIAS	NÃO PAVIMENTADA (km)	PAVIMENTADA (km)			EM OBRAS (km)			TOTAL (km)
		Pista simples	Pista dupla	Total	Pista simples	Pista dupla	Total	
TOTAL GERAL	96.788,97	12.984,36	973,11	20.310,56	139,8	-	1.487,54	118.587,07
Federais mantidas pelo DNIT	88	1.438,33	318,8	1.757,13	139,8	-	139,8	1.984,93
DNIT	88	1.344,73	116,8	1.461,53	139,8	-	139,8	1.689,33
Federais concedidas pelo Gov. Federal	-	-	-	-	-	-	-	0
Totais Concessões Federais	-	93,6	202	295,6	-	-	-	295,6
Totais DER	1.675,80	9.644,84	83,61	9.728,45	-	-	-	11.404,25
Estaduais mantidas pelo DER	1.675,80	9.486,14	68,61	9.554,75	-	-	-	11.230,55
Federais delegadas ao Paraná e mantidas pelo DER	-	158,7	15	173,7	-	-	-	173,7

1. INTRODUÇÃO

Continuação da Tabela 1.2 – Resumo da malha rodoviária do Paraná em novembro de 2011 (IPARDES, 2011).

SITUAÇÃO DAS RODOVIAS	NÃO PAVIMENTADA (km)	PAVIMENTADA (km)			EM OBRAS (km)			TOTAL (km)
		Pista simples	Pista dupla	Total	Pista simples	Pista dupla	Total	
Totais Concessões Estaduais	-	1.901,19	570,7	2.471,89	-	-	-	2.471,89
Estaduais concedidas pelo DER	-	472,89	198,7	671,59	-	-	-	671,59
Federais delegadas ao Paraná e concedidas pelo DER	-	1.428,30	372	1.800,30	-	-	-	1.800,30
Totais Rodovias Municipais	95.025,17	-	-	6.353,09	-	-	1.347,74	102.726,00

FONTE: SEIL-PR

- (1) As rodovias federais são definidas pelo Plano Nacional de Viação (PNV) apresentadas no site do DNIT (www.dnit.gov.br). Posição em 18 de novembro de 2011.
- (2) A malha rodoviária do Estado do Paraná é constituída por rodovias federais, estaduais e municipais. As rodovias estaduais são definidas pelo Sistema Rodoviário Estadual (S.R.E.), e podem ser administradas pelas instituições públicas responsáveis - DER (Governo Estadual), DNIT (Governo Federal) ou concedidas à iniciativa privada (Empresas Concessionárias). Atualmente existem trechos de rodovias federais delegados ao Estado, sendo que alguns são administrados pelo próprio DER e outros foram concedidos às Empresas Concessionárias.

De acordo com dados do Censo Demográfico 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010a), 481.688 residências no estado do Paraná se localizam em ruas não pavimentadas.

Na Capital do Paraná, Curitiba, 94,7% das rodovias são pavimentadas, sendo o quarto município mais pavimentado do país, atrás apenas dos municípios de Belo Horizonte, com 98,2%, Goiânia, com 98,1% e São Paulo, com 97,2% (IBGE, 2010a).

Porém, a realidade da capital paranaense, apesar de parecer otimista, apresenta dados contraditórios. De acordo com dados do Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba – IPPUC (2013), 58,4% do revestimento asfáltico da capital paranaense é o tratamento superficial betuminoso, comumente chamado por antipó, um revestimento alternativo que chegava a custar quatro vezes menos

1. INTRODUÇÃO

que o asfalto convencional, porém possui manutenção mais cara, tornando-se inviável, e atualmente já se encontra em desuso, 32,8% é asfalto ou concreto, 8,1% é saibro e 0,7% são pedras irregulares ou paralelepípedos. De acordo com o Paraná Cidade da Secretaria de Desenvolvimento Urbano do município de Curitiba, em palestra presenciada em 20 de outubro de 2011, presidida por equipe composta pela Senhora Marinês Verônica Prado, Arquiteto Fernando Domingues Caetano e Geógrafo Carlos Storer, já não são fornecidos mais financiamentos aos municípios, através do Fundo de Desenvolvimento Urbano (FDU), para execução de revestimentos tipo antipó. Dessa forma, é possível verificar o motivo do resultado da pesquisa realizada pelo Datafolha em julho de 2012, na qual 10% da população curitibana consideraram os asfaltos e buracos o principal problema no município, mesmo Curitiba tendo 94,7% de suas rodovias pavimentadas, sendo que a margem de erro máxima da pesquisa, registrada no Tribunal Regional Eleitoral, TER, sob número PR-00017/2012, é de 3% para mais ou para menos, considerando um nível de confiança de 95%.

Nos demais municípios do estado e da região metropolitana a realidade se torna ainda pior, em Piraquara, por exemplo, 81,22% das rodovias não são pavimentadas, em Almirante Tamandaré, 68,48%, em Campina Grande do Sul, 59,69% e em Pinhais, 38,99%. Doutor Ulysses é o município menos pavimentado do estado do Paraná, possuindo apenas 11,96% das rodovias pavimentadas. Essa deve ser a razão pela qual, durante a palestra o Paraná Cidade da Secretaria de Desenvolvimento Urbano do município de Curitiba foi informado que 70% dos projetos analisados pelo órgão, afim de obtenção de financiamento, tratam-se de projetos de pavimentação (IBGE, 2010a).

Sabe-se, ainda, que a rodovia é um fator indutor de desenvolvimento econômico e social, na medida em que ela funciona como elemento facilitador do transporte de pessoas e bens, promovendo a circulação rápida de produtos, a exploração econômica de novas regiões, a diminuição dos custos de transportes e o alargamento das fronteiras dos municípios, permitindo sua ligação mais rápida e segura com outras localidades, além de novos equipamentos de saúde e educação (OLIVEIRA, 2010).

Para analisar a importância social de uma rodovia, verificou-se uma aplicação prática, o PROACESSO, Programa de Pavimentação de Ligações e

1. INTRODUÇÃO

Acessos Rodoviários aos Municípios, desenvolvido pelo Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais, cujo objetivo foi o de pavimentar 5,45 mil km de rodovias neste estado, promovendo a integração de 225 municípios, correspondentes a 26% dos municípios mineiros, a outras regiões. O pesquisador comenta que de acordo com o DER, com a execução dessa pavimentação, esperava-se os seguintes resultados:

- aumento da acessibilidade, com melhoria das condições de escoamento dos produtos locais e impactos positivos no incremento e competitividade da economia regional;
- redução dos custos operacionais dos veículos, com impactos positivos no preço dos fretes e das tarifas pagas pelos usuários;
- redução do tempo das viagens e aumento das condições de conforto e segurança de operadores e usuários;
- facilitação do acesso das populações locais aos serviços sociais instalados em polos microrregionais de maior porte;
- incremento das atividades econômicas e, conseqüentemente, aumento dos recursos tributários arrecadados nos municípios beneficiados;
- criação de oportunidades de emprego e geração de renda nas áreas beneficiadas; e;
- maior proteção ambiental, uma vez que a exploração pouco racional das jazidas para manutenção do revestimento primário dos acessos, além de prejudicar o ecossistema do entorno, exaure as fontes de material necessárias para futuras pavimentações.

De acordo com Oliveira (2010), a satisfação da população beneficiada pelo PROACESSO foi explicitada em depoimentos incluídos no Livro lançado pelo DER/MG chamado PROACESSO, que ratificaram a importância social e econômica da pavimentação das rodovias. Além disso, foram verificadas melhorias nos seguintes aspectos: acessibilidade e mobilidade, conforme

Tabela 1.3, além do incremento na economia local, que influenciou no recolhimento de impostos, onde foi constatado um aumento de até 395% na arrecadação, da diminuição dos custos operacionais de transporte, como gasolina e

1. INTRODUÇÃO

manutenção de veículos, e benefícios até então imensuráveis nas áreas de saúde e educação.

Tabela 1.3 – Comparativo da redução do tempo gasto em viagens (AUGE, 2008 apud OLIVEIRA, 2010).

Cidade	Trecho	Tempo de viagem (minutos)		
		Antes da pavimentação	Depois da pavimentação	Redução (%)
Taquaraçu de Minas	Taquaraçu de Minas – entr. BR381	36	15	59%
Taquaraçu de Minas	Taquaraçu de Minas – BH	90	60	34%
Passabém	Passabém – entr. BR120	30	7	77%
Passabém	Passabém – Santa Maria de Itabira	50	25	50%
Passabém	Passabém – Itabira	90	60	34%

Verifica-se, para constatar tal questão no estado do Paraná, uma relação entre o percentual de rodovias não pavimentadas e a economia dos municípios. Para isso, foram selecionados os percentuais de domicílios com renda per capita inferior a meio salário mínimo dos dez municípios considerados mais pobres no estado do Paraná, de acordo com o Censo Demográfico 2010, e o percentual de rodovias não pavimentadas nesses municípios, conforme resultados apresentados na Tabela 1.4 e na Figura 1.2, sendo que é possível observar uma tendência de aumento de um fator em decorrência do outro, confirmando que as rodovias são indutores da economia, conforme já constatado pelos resultados da implementação do programa PROCESSO, e a ausência delas corroboram para o não desenvolvimento econômico, como é o caso dos municípios de Campina do Simão, Cerro Azul, Doutor Ulysses, Goioxim, Guaraqueçaba, Inácio Martins, Laranjal e Mato Rico do estado do Paraná.

O mesmo se observa com os dez municípios do estado com maior produto interno bruto, caso de Curitiba, São José dos Pinhais, Araucária, Londrina, Maringá, Paranaguá, Foz do Iguaçu, Ponta Grossa, Cascavel e Pinhais. Conforme se observa na Tabela 1.5 e na Figura 1.3, existe uma tendência linear de aumento no percentual de rodovias pavimentadas, quanto maior o produto interno bruto do município, colaborando ainda mais com a prerrogativa apresentada no parágrafo anterior.

1. INTRODUÇÃO

Tabela 1.4 – Comparativo entre percentual de rodovias não pavimentadas e a economia dos dez municípios mais “pobres” do estado do Paraná (adaptado pela autora de IBGE, 2010a).

Município	% de rodovias não pavimentadas	% de domicílios com renda per capita inferior a meio salário mínimo
Campina do Simão	64%	47%
Cerro Azul	68%	48%
Doutor Ulysses	88%	50%
Goioxim	46%	53%
Guaraqueçaba	46%	52%
Inácio Martins	57%	49%
Laranjal	85%	57%
Mato Rico	40%	49%
Rio Bonito do Iguaçu	40%	48%
Santa Maria do Oeste	70%	49%

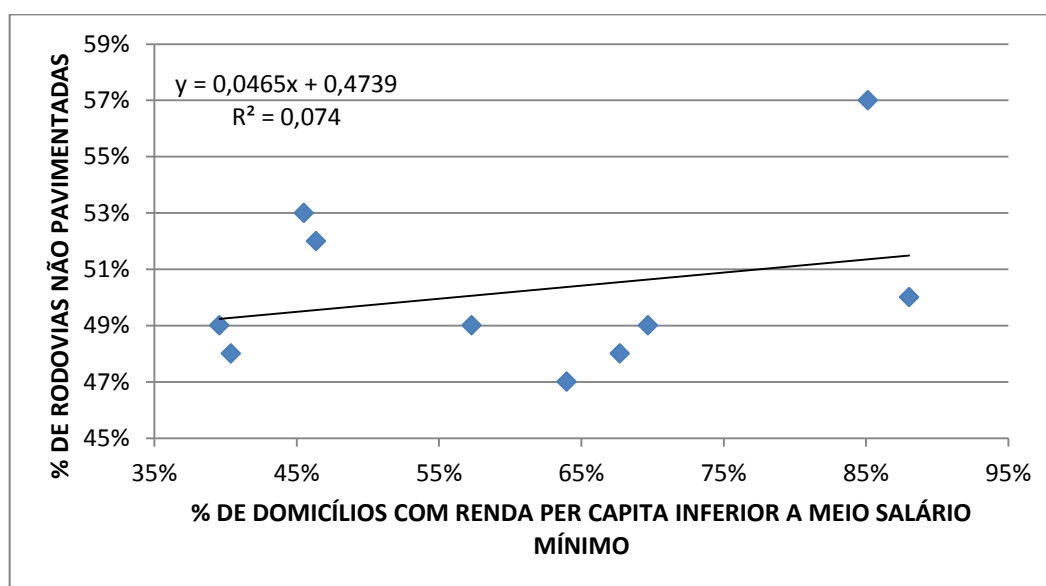


Figura 1.2 – Comparativo entre percentual de rodovias não pavimentadas e a economia dos dez municípios mais “pobres” do estado do Paraná (adaptado pela autora de IBGE, 2010a).

1. INTRODUÇÃO

Tabela 1.5 – Comparativo entre percentual de rodovias não pavimentadas e o PIB dos dez municípios mais “ricos” do estado do Paraná (Adaptado pela autora de IBGE,2010a e IBGE, 2010b).

Município	% de rodovias não pavimentadas	PIB em 2010 (em bilhões de reais)
Curitiba	5%	53,10
São José dos Pinhais	10%	13,70
Araucária	10%	12,40
Londrina	1%	9,90
Maringá	2%	8,30
Paranaguá	26%	7,20
Foz do Iguaçu	2%	6,80
Ponta Grossa	39%	5,90
Cascavel	13%	5,20
Pinhais	39%	4,50

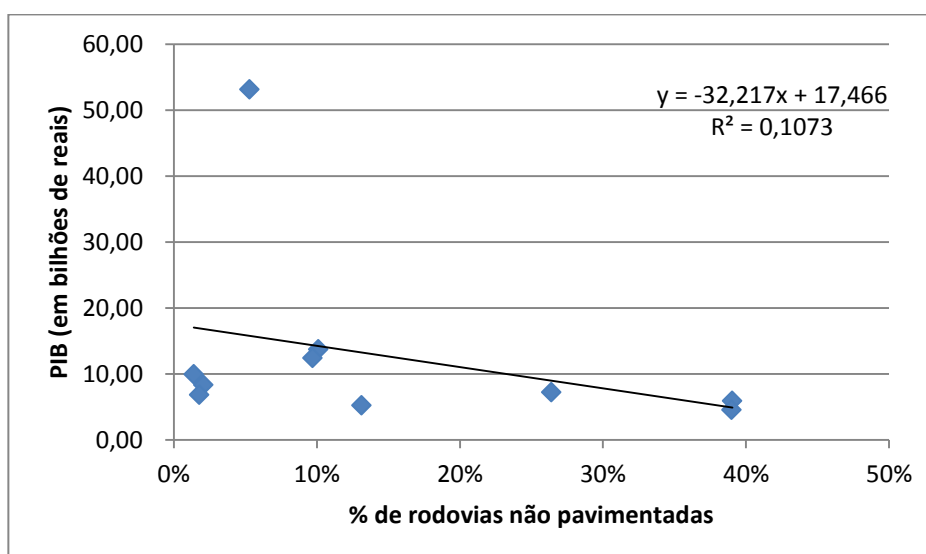


Figura 1.3 – Comparativo entre percentual de rodovias não pavimentadas e o PIB dos dez municípios mais “ricos” do estado do Paraná (adaptado pela autora de IBGE,2010a e IBGE,2010b).

1. INTRODUÇÃO

Os resultados da Pesquisa CNT de Rodovias (2011), conforme se verifica na Figura 1.4 e na Tabela 1.6 apontam que 47,9% dos pavimentos, totalizando 44.479 km de rodovias, foram classificados como deficientes (regular, ruim ou péssimo), necessitando de algum tipo de melhoria, podendo ser tanto a restauração do pavimento, quanto a reconstrução total do mesmo. Um pavimento em estado deficiente pode prejudicar a atividade de transporte de cargas e de passageiro no país.

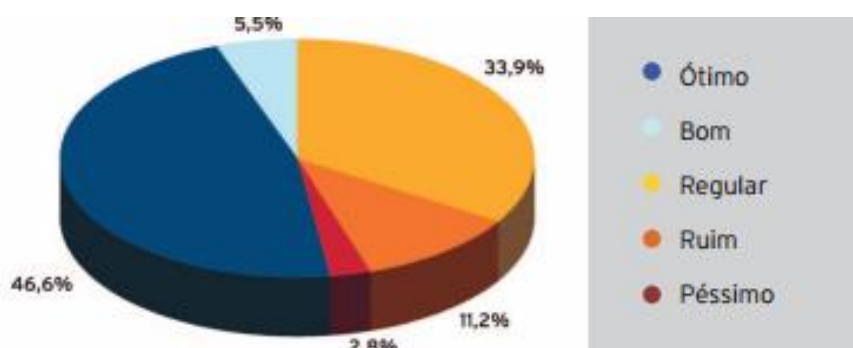


Figura 1.4 – Classificação do Pavimento – Extensão Total (CNT, 2011).

Tabela 1.6 – Classificação do Pavimento (CNT, 2011).

Pavimento	Extensão total	
	km	%
Ótimo	43233	46,6
Bom	5035	5,5
Regular	31429	33,9
Ruim	10432	11,2
Péssimo	2618	2,8
Total	92747	100,0

A falta de investimento se reflete nos seguintes custos, referentes à veículos que circulam em rodovias com mau estado de conservação: elevação em 58% do consumo de combustível, 38% do custo de manutenção dos veículos, 38% do custo

1. INTRODUÇÃO

do frete, além de 50% a mais de acidentes e até o dobro do tempo gasto em viagem (CNT, 2001 *apud* BARTHOLOMEU, 2006).

Além disso, segundo estudo encomendado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), citado por IPEA (2012), cada acidente em rodovias federais do país custam ao Estado e à sociedade cerca de 53,4 mil reais, que totalizaram R\$ 8,5 bilhões de reais em 2009. Esse cálculo leva em conta diversos aspectos, como danos materiais, físicos e emocionais, gastos com socorro médico, perda de rendimentos futuros com a morte ou invalidez da vítima e até prejuízos com congestionamentos.

Segundo a CNT (2011), de acordo com estudo desenvolvido pelo próprio órgão (Plano CNT de Transporte e Logística 2011), são necessários R\$ 190 bilhões para investimento na construção e na execução de obras rodoviárias prioritárias, sendo que a escassez identificada pela CNT é referente, apenas, à necessidade atual de rodovias. Fica evidente que, apesar do crescente esforço de retomada de investimento público em infraestrutura, os resultados obtidos ainda são baixos para impulsionar o crescimento econômico.

A infraestrutura logística brasileira, resultado de vários anos de baixos investimentos públicos, restringe o desenvolvimento do país e das empresas nacionais. Observa-se que em 1975 foram investidos 1,84% do PIB em infraestruturas de transportes, enquanto que de 2000 a 2010 essa média foi de 0,23%, já os países do BRIC (Brasil, Rússia, Índia e China) investem de 7,0% a 10,0% do PIB em infraestruturas de transporte (CNT, 2011).

Diante da importância do modal rodoviário brasileiro, em contrapartida com o investimento no setor, verificam-se altos custos logísticos incorridos, que fazem com que produtos brasileiros não consigam competir no mercado externo, afetando diretamente o chamado Custo Brasil e restringindo o crescimento da economia brasileira, como exemplo pode-se citar o custo do frete rodoviário da soja, que no Brasil é 3,7 vezes maior que na Argentina e 4,3 vezes maior que nos EUA (CNT, 2011).

De acordo com Cavalcante (2006) torna-se imprescindível que esse quadro seja alterado, a fim de garantir a eficiência do setor de transporte rodoviário de

1. INTRODUÇÃO

cargas e de passageiros, e assim assegurar o desenvolvimento integral do País, investindo na manutenção, recuperação, duplicação e construção de rodovias.

1.3. Políticas nacionais acerca da sustentabilidade

1.3.1. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981

Esta lei estabelece a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, constitui o Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) e institui o Cadastro de Defesa Ambiental.

O SISNAMA, Sistema Nacional do Meio Ambiente, é constituído por órgãos e entidades da União, dos Estados, do Distrito Federal, dos Territórios e dos Municípios, bem como as fundações instituídas pelo Poder Público, responsáveis pela proteção e melhoria da qualidade ambiental e possui como órgão consultivo e deliberativo o CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente, com a finalidade de assessorar, estudar e propor ao Conselho de Governo, diretrizes de políticas governamentais para o meio ambiente e os recursos naturais e deliberar, no âmbito de sua competência, sobre normas e padrões compatíveis com o meio ambiente ecologicamente equilibrado e essencial à sadia qualidade de vida.

“ Art 6º - Os órgãos e entidades da União, dos Estados, do Distrito Federal, dos Territórios e dos Municípios, bem como as fundações instituídas pelo Poder Público, responsáveis pela proteção e melhoria da qualidade ambiental, constituirão o Sistema Nacional do Meio Ambiente - SISNAMA, assim estruturado:

I - órgão superior: o Conselho de Governo, com a função de assessorar o Presidente da República na formulação da política nacional e nas diretrizes governamentais para o meio ambiente e os recursos ambientais;

II - órgão consultivo e deliberativo: o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), com a finalidade de assessorar, estudar e propor ao Conselho de Governo, diretrizes de políticas governamentais para o meio ambiente e os recursos naturais e deliberar, no âmbito de sua competência, sobre normas e padrões compatíveis com o meio ambiente ecologicamente equilibrado e essencial à sadia qualidade de vida;

1. INTRODUÇÃO

III - órgão central: a Secretaria do Meio Ambiente da Presidência da República, com a finalidade de planejar, coordenar, supervisionar e controlar, como órgão federal, a política nacional e as diretrizes governamentais fixadas para o meio ambiente;

IV - órgão executor: o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, com a finalidade de executar e fazer executar, como órgão federal, a política e diretrizes governamentais fixadas para o meio ambiente;

V - Órgãos Seccionais: os órgãos ou entidades estaduais responsáveis pela execução de programas, projetos e pelo controle e fiscalização de atividades capazes de provocar a degradação ambiental;

VI - Órgãos Locais: os órgãos ou entidades municipais, responsáveis pelo controle e fiscalização dessas atividades, nas suas respectivas jurisdições;

§ 1º Os Estados, na esfera de suas competências e nas áreas de sua jurisdição, elaborarão normas supletivas e complementares e padrões relacionados com o meio ambiente, observados os que forem estabelecidos pelo CONAMA.

§ 2º Os Municípios, observadas as normas e os padrões federais e estaduais, também poderão elaborar as normas mencionadas no parágrafo anterior.

§ 3º Os órgãos central, setoriais, seccionais e locais mencionados neste artigo deverão fornecer os resultados das análises efetuadas e sua fundamentação, quando solicitados por pessoa legitimamente interessada.

§ 4º De acordo com a legislação em vigor, é o Poder Executivo autorizado a criar uma Fundação de apoio técnico científico às atividades do IBAMA.”

No Artigo 10, consta a obrigatoriedade do prévio licenciamento ambiental em caráter nacional, para construção, instalação, ampliação e funcionamento de estabelecimentos e atividades utilizadores de recursos ambientais, efetiva ou potencialmente poluidores ou capazes, sob qualquer forma, de causar degradação ambiental.

Em palestra presidida pelo Dr. Edson Luiz Peters, no I Workshop de Rodovias Sustentáveis, ocorrida no dia 27 de julho de 2012 na cidade de Curitiba, estado do Paraná, o Procurador de Justiça esclareceu que as competências

1. INTRODUÇÃO

políticas públicas ambientais, no que elucida a Lei nº 6.938/81, que fundamenta e disciplina todas as ações garantidoras da sustentabilidade ambiental, são setorizadas para os municípios e estados brasileiros.

1.3.2. Constituição Federal

No artigo 225, que trata do Meio Ambiente, verifica-se a exigência de estudo prévio de impacto ambiental, EPIA, cuja nomenclatura foi modificada para EIA, estudo de impacto ambiental, para instalação de obra ou atividade potencialmente causadora de significativa degradação do meio ambiente, devendo o estudo ser precedente à licitação.

“Art. 225º Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.

§ 1º - Para assegurar a efetividade desse direito, incumbe ao Poder Público:

I - preservar e restaurar os processos ecológicos essenciais e prover o manejo ecológico das espécies e ecossistemas;

II - preservar a diversidade e a integridade do patrimônio genético do País e fiscalizar as entidades dedicadas à pesquisa e manipulação de material genético;

III - definir, em todas as unidades da Federação, espaços territoriais e seus componentes a serem especialmente protegidos, sendo a alteração e a supressão permitidas somente através de lei, vedada qualquer utilização que comprometa a integridade dos atributos que justifiquem sua proteção;

IV - exigir, na forma da lei, para instalação de obra ou atividade potencialmente causadora de significativa degradação do meio ambiente, estudo prévio de impacto ambiental, a que se dará publicidade;

V - controlar a produção, a comercialização e o emprego de técnicas, métodos e substâncias que comportem risco para a vida, a qualidade de vida e o meio ambiente;

1. INTRODUÇÃO

VI - promover a educação ambiental em todos os níveis de ensino e a conscientização pública para a preservação do meio ambiente;

VII - proteger a fauna e a flora, vedadas, na forma da lei, as práticas que coloquem em risco sua função ecológica, provoquem a extinção de espécies ou submetam os animais a crueldade.

§ 2º - Aquele que explorar recursos minerais fica obrigado a recuperar o meio ambiente degradado, de acordo com solução técnica exigida pelo órgão público competente, na forma da lei.

§ 3º - As condutas e atividades consideradas lesivas ao meio ambiente sujeitarão os infratores, pessoas físicas ou jurídicas, a sanções penais e administrativas, independentemente da obrigação de reparar os danos causados.

§ 4º - A Floresta Amazônica brasileira, a Mata Atlântica, a Serra do Mar, o Pantanal Mato-Grossense e a Zona Costeira são patrimônio nacional, e sua utilização far-se-á, na forma da lei, dentro de condições que assegurem a preservação do meio ambiente, inclusive quanto ao uso dos recursos naturais.

§ 5º - São indisponíveis as terras devolutas ou arrecadadas pelos Estados, por ações discriminatórias, necessárias à proteção dos ecossistemas naturais.

§ 6º - As usinas que operem com reator nuclear deverão ter sua localização definida em lei federal, sem o que não poderão ser instaladas.”

No artigo 170, verifica-se a regulamentação de tratamento diferenciado, podendo ser tanto tributário, quanto para desempate ou decisão de um processo licitatório, visando o seguimento de princípios referentes a defesa do meio ambiente.

“Art. 170. A ordem econômica, fundada na valorização do trabalho humano e na livre iniciativa, tem por fim assegurar a todos existência digna, conforme os ditames da justiça social, observados os seguintes princípios:

(...)

VI - defesa do meio ambiente, inclusive mediante tratamento diferenciado conforme o impacto ambiental dos produtos e serviços e de seus processos de elaboração e prestação; (Redação dada pela Emenda Constitucional nº 42, de 19.12.2003) (...).”

1. INTRODUÇÃO

1.3.3. Lei nº 8.666, de 21 de junho de 1993

Esta lei institui normas para licitações e contratos da Administração Pública. Verifica-se que um dos requisitos a serem considerados nos projetos básicos e executivos de obras e serviços é o impacto ambiental.

“Art. 12º Nos projetos básicos e projetos executivos de obras e serviços serão considerados principalmente os seguintes requisitos: (Redação dada pela Lei nº 8.883, de 1994):

(...)

VII - impacto ambiental (...).”

No artigo 3, é possível observar a preocupação com o desenvolvimento nacional sustentável, de modo a selecionar as propostas em licitações através da promoção do desenvolvimento sustentável. Na prática, o que se verifica no Brasil é a licitação que classifica as propostas levando-se em consideração apenas o menor preço.

*“Art. 3º A licitação destina-se a garantir a observância do princípio constitucional da isonomia, **a seleção da proposta mais vantajosa para a administração e a promoção do desenvolvimento nacional sustentável** e será processada e julgada em estrita conformidade com os princípios básicos da legalidade, da impessoalidade, da moralidade, da igualdade, da publicidade, da probidade administrativa, da vinculação ao instrumento convocatório, do julgamento objetivo e dos que lhes são correlatos (Redação dada pela Lei nº 12.349, de 2010).”*

1.3.4. Instrução Normativa nº01, de 19 de janeiro de 2010

Essa instrução normativa dispõe sobre os critérios de sustentabilidade ambiental na aquisição de bens, contratação de serviços ou obras pela Administração Pública Federal direta, autárquica e fundacional, apresentado instrumentos capazes de auxiliar o gestor público na promoção da sustentabilidade nas contratações públicas e elucida a utilização de materiais recicláveis.

1. INTRODUÇÃO

“Art. 1º Nos termos do art. 3º da Lei nº 8.666, de 21 de junho de 1993, as especificações para a aquisição de bens, contratação de serviços e obras por parte dos órgãos e entidades da administração pública federal direta, autárquica e fundacional deverão conter critérios de sustentabilidade ambiental, considerando os processos de extração ou fabricação, utilização e descarte dos produtos e matérias-primas.

Art. 2º Para o cumprimento do disposto nesta Instrução Normativa, o instrumento convocatório deverá formular as exigências de natureza ambiental de forma a não frustrar a competitividade.

Art. 3º Nas licitações que utilizem como critério de julgamento o tipo melhor técnica ou técnica e preço, deverão ser estabelecidos no edital critérios objetivos de sustentabilidade ambiental para a avaliação e classificação das propostas.

Art. 4º Nos termos do art. 12 da Lei nº 8.666, de 1993, as especificações e demais exigências do projeto básico ou executivo, para contratação de obras e serviços de engenharia, devem ser elaborados visando à economia da manutenção e operacionalização da edificação, a redução do consumo de energia e água, bem como a utilização de tecnologias e materiais que reduzam o impacto ambiental, tais como:

(...)

VIII – utilização de materiais que sejam reciclados, reutilizados e biodegradáveis, e que reduzam a necessidade de manutenção; e;

(...)

§ 2º O Projeto de Gerenciamento de Resíduo de Construção Civil - PGRCC, nas condições determinadas pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, através da Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, deverá ser estruturado em conformidade com o modelo especificado pelos órgãos competentes.

§ 3º Os instrumentos convocatórios e contratos de obras e serviços de engenharia deverão exigir o uso obrigatório de agregados reciclados nas obras contratadas, sempre que existir a oferta de agregados reciclados, capacidade de suprimento e custo inferior em relação aos agregados naturais, bem como o fiel cumprimento do PGRCC, sob pena de multa, estabelecendo, para efeitos de

1. INTRODUÇÃO

fiscalização, que todos os resíduos removidos deverão estar acompanhados de Controle de Transporte de Resíduos, em conformidade com as normas da Agência Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, ABNT NBR nºs 15.112, 15.113, 15.114, 15.115 e 15.116, de 2004, disponibilizando campo específico na planilha de composição dos custos.”

1.3.5. Decreto nº 7.746, de 5 de junho de 2012

Esse decreto apresenta diretrizes de sustentabilidade, esclarece a possibilidade de especificar tecnicamente materiais sustentáveis, estando, entre eles, os materiais reciclados.

“Art. 4º São diretrizes de sustentabilidade, entre outras:

- I – menor impacto sobre recursos naturais como flora, fauna, ar, solo e água;*
- II – preferência para materiais, tecnologias e matérias-primas de origem local;*
- III – maior eficiência na utilização de recursos naturais como água e energia;*
- IV – maior geração de empregos, preferencialmente com mão de obra local;*
- V – maior vida útil e menor custo de manutenção do bem e da obra;*
- VI – uso de inovações que reduzam a pressão sobre recursos naturais; e*
- VII – origem ambientalmente regular dos recursos naturais utilizados nos bens, serviços e obras.*

Art. 5º A administração pública federal direta, autárquica e fundacional e as empresas estatais dependentes poderão exigir no instrumento convocatório para a aquisição de bens que estes sejam constituídos por material reciclado, atóxico ou biodegradável, entre outros critérios de sustentabilidade.

Art. 6º As especificações e demais exigências do projeto básico ou executivo para contratação de obras e serviços de engenharia devem ser elaboradas, nos termos do art. 12 da Lei nº 8.666, de 1993, de modo a proporcionar a economia da manutenção e operacionalização da edificação e a redução do consumo de energia e água, por meio de tecnologias, práticas e materiais que reduzam o impacto ambiental.

1. INTRODUÇÃO

Art. 7º O instrumento convocatório poderá prever que o contratado adote práticas de sustentabilidade na execução dos serviços contratados e critérios de sustentabilidade no fornecimento dos bens.”

1.4. A importância da sustentabilidade aliada à reciclagem de resíduos da construção civil

Segundo Capra (2008), o conceito de sustentabilidade foi introduzido na década de 1980 por Lester Brown, fundador do Wordwatch Institute, que definiu comunidade sustentável como a que é capaz de satisfazer as próprias necessidades sem reduzir as oportunidades das gerações futuras.

Aranha (2009) explica que a vida do ser humano está diretamente ligada aos recursos que o planeta oferece (ar, água, terra, minerais, planta e animais) e a extensão do impacto humano sobre a terra depende do número de pessoas existentes e da quantidade de recursos utilizados, sendo que o uso máximo de recursos que o planeta ou uma determinada região pode sustentar define sua capacidade de provisão, podendo ser aumentada pela agricultura ou tecnologia. A autora ainda complementa que a capacidade de provisão é limitada pela capacidade da natureza de se recompor ou absorver resíduos de modo seguro, além disso, nossas civilizações estão hoje ameaçadas, pois utilizamos mal os recursos e perturbamos os sistemas naturais, de fato, estamos pressionando a Terra até os limites de sua capacidade.

É preocupante o modo com que os recursos naturais e culturais brasileiros vêm sendo tratados, especialmente frente à busca desenfreada pelo lucro, muitas vezes ocasionadas por estrangeiros, ignorando totalmente as consequências de uma possível extinção dos recursos naturais e parecendo esquecer que esses recursos ou não são renováveis ou demandam longo tempo para se refazerem (BRASIL, 1997).

Além disso, a política tradicional de apenas tratar o lixo com base em um modelo linear de desenvolvimento, que postula que a natureza é fonte inesgotável de recursos materiais e energéticos e possui capacidade infinita de deposição, está sendo substituída, aos poucos, por um modelo com base em ciclos de vida e integração da gestão de resíduos (SILVA, 2009).

1. INTRODUÇÃO

A disseminação do conceito de sustentabilidade e sua penetração nas práticas sociais ainda está numa etapa incipiente, apesar de mais de duas mil companhias no mundo já apresentarem rotineiramente relatórios de sustentabilidade. No Brasil, o Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável (CEBDS) publica a cada dois anos o seu Relatório de Sustentabilidade Empresarial, consolidando os dados relativos ao desempenho econômico, ambiental e social de suas associadas (ALMEIDA, 2008).

De acordo com Loureiro *et al.* (2005) *apud* Silva (2009), a compreensão da necessidade do gerenciamento integrado dos resíduos sólidos propiciou a formulação da chamada Política ou Pedagogia dos 3R's, que recebeu essa nomenclatura devido à junção das iniciais das palavras: reduzir, reutilizar e reciclar, formando um slogan de grande eficácia, que inspira técnica e pedagogicamente os meios de enfrentamento da questão do lixo.

Cada vez mais a sustentabilidade vem sendo estudada e aplicada na construção civil, como modo de mitigar a exploração da natureza e seus efeitos acumulados durante anos de exploração desenfreada. No Brasil são realizados eventos visando promover essa integração, como o Seminário da Construção Civil e Sustentabilidade, realizado em 2007 em São Paulo, o Workshop do PROCIMM, realizado em maio de 2011 em Santa Catarina, o Workshop Sustentabilidade e a Indústria da Construção Civil no Brasil, realizado em março de 2012 em Manaus, entre diversos outros. Em julho de 2012 foi realizado em Curitiba um Workshop de Rodovias Sustentáveis, voltado exclusivamente à sustentabilidade de rodovias, no qual foi enfatizada a importância deste fato.

De acordo com Zordan (1999), praticamente todas as atividades desenvolvidas no setor da construção civil são geradoras de entulho, sendo que no processo construtivo, o alto índice de perdas do setor é a principal causa do entulho gerado. Calcula-se que são gerados, no país, em média, 500 kg/hab.ano de resíduos de construção e demolição (RCD). Além disso, a taxa de geração de resíduos de construção é da ordem de 150 quilos por metro quadrado construído (PINTO, 1999).

Diante desta problemática, alguns países vêm se preocupando com a destinação desses resíduos. O RCD foi classificado como resíduo prioritário pelo Community European Committee (CEC) e sua reciclagem tem sido estudada com

1. INTRODUÇÃO

afinco por vários países desenvolvidos há algumas décadas (RUCH *et al.*, 1997, *apud* MIRANDA, 2005).

Segundo Momber (2002), nos países da Comunidade Europeia, em média 60% do RCD gerado (aproximadamente 180 milhões de toneladas) está sendo reciclado correntemente. No entanto, mesmo dentro da Comunidade Europeia, existem diferenças bastante significativas. Enquanto países como Espanha, Portugal, Grécia e Irlanda reciclam menos de 5% do RCD gerado, o Reino Unido e a Finlândia reciclam 45% e a Holanda recicla em média 90% (EC, 1999).

A Espanha e os Estados Unidos são exemplos de países que implantaram programas governamentais de incentivos com o objetivo de diagnosticar os setores produtores de resíduos, suas fontes geradoras, tipos e quantidades, subsidiando o aproveitamento através da reciclagem. Alguns países que possuem pouco material primário, como Bélgica, Holanda e Dinamarca, reciclam mais de 90% dos RCD e ainda assim, importam resíduos de construção da Inglaterra e areia da Sibéria (CIOCCHI, 2003).

No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA (2002) implantou a Resolução 307, onde declara que se faz necessária a implantação de diretrizes para a efetiva redução dos impactos ambientais gerados pelos resíduos oriundos da construção civil, já que a disposição de resíduos da construção civil em locais inadequados contribui para a degradação da qualidade ambiental, representam um significativo percentual dos resíduos sólidos produzidos nas áreas urbanas e considerando que a viabilidade técnica e econômica de produção e uso de materiais provenientes da reciclagem de resíduos da construção civil e a gestão integrada de resíduos da construção civil deverá proporcionar benefícios de ordem social, econômica e ambiental.

No Brasil, do total de 5.564 municípios, 72,44% dos municípios avaliados pela PNSB possuem serviço de manejo de resíduos de construção civil, sendo que, 2.937 (52,79%) exercem o controle sobre os serviços de terceiros para os resíduos especiais. A maioria dos municípios (55,26%) exerce o controle sobre o manejo de resíduos especiais executados por terceiros para manejo de RCC (BRASIL, 2011).

Segundo Schneider (2003), na cidade de São Paulo, a geração diária de resíduos de construção no ano de 2003 foi estimada em 16.000 toneladas/dia e os

1. INTRODUÇÃO

gastos no sistema de coleta, transporte e destinação final alcançaram mais de R\$ 263 milhões entre os anos de 1993 e 2002.

Além disso, o agregado reciclado chega a custar 3,4 vezes menos que o agregado pétreo britado, sem considerar o custo do transporte que é maior para o agregado pétreo britado que para o agregado reciclado, já que as pedreiras são situadas nas periferias (SILVA, 2009). Moreira *et al.* (2007) enfatizam que os danos ambientais e as distâncias de transporte são problemas cada vez maiores para se obter jazidas com materiais adequados para construção de camadas de pavimento, fato que torna vantajosa a utilização de entulho reciclável no lugar de jazidas naturais. Segundo a tabela de preços da Prefeitura Municipal de São Paulo – PMSP (2003), a execução de 1 m³ da camada de base de um pavimento executada com agregado reciclado custa, em média, 18% a menos que o mesmo serviço se executado com o material convencional (brita graduada natural).

A reciclagem na construção civil pode gerar inúmeros benefícios, como os citados abaixo:

- redução no consumo de recursos naturais não renováveis, quando substituídos por resíduos recicláveis (JOHN, 2000);
- redução de áreas necessárias para aterro, pela minimização de volume de resíduos pela reciclagem. Destaca-se aqui a necessidade da própria reciclagem dos resíduos de construção e demolição, que representam mais de 50% da massa dos resíduos sólidos urbanos (PINTO, 1999);
- redução do consumo de energia durante o processo de produção. Destaca-se a indústria do cimento, que usa resíduos de bom poder calorífico para a obtenção de sua matéria-prima (coincineração) ou utilizando a escória de alto-forno, resíduo com composição semelhante ao cimento (JOHN, 2000);
- redução da poluição; por exemplo para a indústria de cimento que reduz a emissão de gás carbônico utilizando a escória de alto forno em substituição ao cimento Portland (JOHN, 2000);
- redução da poluição gerada pelo entulho e de suas consequências negativas ao ambiente como enchentes e assoreamentos de rios e córregos, além da preservação das reservas naturais de matéria-prima (ZORDAN, 1999).

1. INTRODUÇÃO

O meio científico vêm desenvolvendo estudos e pesquisas para promover a utilização de produtos reciclados na pavimentação, tais como: reciclagem da camada asfáltica envelhecida, uso de escória de alto-forno e aciaria, uso de borracha reciclada de pneus e resíduos de construção civil, além da utilização de resíduos sólidos da decantação da matéria orgânica dos esgotos em concreto de cimento Portland e da borra de carbureto como aditivo melhorador de solo (PATRIOTA *et al.*, 2004).

De acordo com Silva (2009), os danos nos pavimentos são causados pela passagem de veículos comerciais com frequência razoável e o autor coloca a egrégia questão: *Por que usar em via de tráfego local, materiais pétreos considerados nobres, com custo de aquisição elevado, se os mesmos podem ser substituídos por agregados alternativos que possibilitam ao concreto asfáltico características suficientes para atender aos requisitos exigidos?* E, ainda, ressalta a existência de pesquisas com resultados satisfatórios, visando a utilização de RCD, tanto no aspecto econômico, quanto no técnico, que é uma destinação alternativa para esse material, reduzindo a necessidade de depósitos e, inclusive, preservando as fontes naturais.

De acordo com Marinho (2011), o uso de agregados reciclados de RCD nas camadas de base e sub-base, no país, data de meados da década de 80. As pesquisas anteriormente realizadas (MOTTA, 2005; LEITE, 2007) analisaram as propriedades físicas, químicas e mecânicas dos agregados reciclados de construção civil para camadas de base, sub-base e reforço de pavimentos, demonstrando que os mesmos podem ser empregados, dentre outras aplicações, em substituição aos materiais naturais convencionalmente utilizados com consequente redução nos impactos ambientais e custos das obras.

Em países onde já existe um conhecimento consolidado sobre o assunto, estes agregados vêm sendo amplamente utilizados nas camadas de base e sub-base dos pavimentos, por ser um material que comprovadamente apresenta boa resistência e baixa expansão, desde que atenda às especificações da norma ABNT NBR 15116:2004 (MARINHO, 2011).

A utilização do resíduo da construção civil na pavimentação pode trazer como benefício ambiental a diminuição do problema da deposição deste rejeito que

1. INTRODUÇÃO

necessita de grandes áreas para descarte e, ao mesmo tempo, diminui-se a degradação ambiental provocada pela extração de agregados pétreos.

De acordo com Marinho (2011) em países como Japão, França, Inglaterra, Itália, Holanda, Alemanha, Bélgica, EUA e Canadá, a reciclagem é uma prática consolidada e existem milhares de usinas de reciclagem de RCD instaladas, sendo que os governos locais dispõem de leis que exigem o uso de materiais reciclados na construção e em serviços públicos. Alguns municípios brasileiros, como Belo Horizonte, São Paulo, Ribeirão Preto, Campinas e outros já possuem programas voltados para a coleta e o reaproveitamento do entulho em obras de pavimentação (SILVA, 2009).

De acordo com Albano (1998) este é o atual desafio rodoviário brasileiro: vias em boas condições, custos de construção e manutenção reduzidos, menores tempos de deslocamentos e fluxo de tráfego seguro. A autora insere ao desafio rodoviário brasileiro a sustentabilidade e reciclagem de resíduos da construção civil, devido aos seus graus de importância já apresentados nesta introdução.

1.5. Objetivo da pesquisa

1.5.1. *Objetivo geral*

O objetivo do trabalho é analisar a viabilidade técnica e econômica de substituição de agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado de concreto na produção de CBUQ, de modo a garantir o bom desempenho do revestimento asfáltico produzido, visando sua utilização em pavimentos de baixo volume de tráfego.

1.5.2. *Objetivos específicos*

São objetivos específicos deste trabalho:

- avaliar as características físicas e mecânicas do ARCg e verificar a sua conformidade aos padrões exigidos para uso em concretos asfálticos;
- avaliar os efeitos das propriedades volumétricas face à substituição dos agregados graúdos naturais pelos reciclados, adotando a metodologia de

1. INTRODUÇÃO

dosagem tipo Marshall, concomitantemente à determinação da densidade máxima medida, através do RICE;

- avaliar o comportamento mecânico das misturas obtidas através do ensaio de deformação permanente na mesa compactadora e simulador de tráfego LCPC e do ensaio Lottman;
- orçar os custos das misturas;
- por último, avaliar a viabilidade da substituição de agregado graúdo natural por ARCg em CBUQ para baixo volume de tráfego.

1.6. Justificativas

Considerando o exposto anteriormente neste capítulo, fica evidente a necessidade de reciclagem dos RCD, gerados em larga escala pela indústria de construção civil, e de aumentar as alternativas de aplicação do agregado reciclado. Com o incentivo apropriado do governo, seria possível a aplicação de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil para a aplicação a que se destina verificar essa pesquisa, que, caso se comprove viável técnica, ambiental e economicamente, poderá viabilizar, portanto, o aumento da malha rodoviária paranaense e, por que não assim dizer, brasileira.

Deve-se salientar que os estudos já desenvolvidos no país com esse objetivo são escassos, conforme comprova a revisão bibliográfica realizada nesta pesquisa. Sendo assim, este trabalho tem sua importância e justificativa comprovada, pois os revestimentos asfálticos tipo CBUQ com parte dos agregados graúdos naturais substituídos por ARCg podem se apresentar como uma nova alternativa para a minimização dos problemas já descritos neste capítulo e certamente a mitigação do impacto ambiental, existente com a demasiada exploração de pedreiras e disposição irregular de resíduos.

1.7. Contextualização no programa

Este é o primeiro projeto de pesquisa do PPGECC (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil) que foca no uso de agregados

1. INTRODUÇÃO

reciclados em CBUQ. Também é o primeiro projeto de mestrado com ênfase em CBUQ, o que marca a abertura de uma nova linha de pesquisa no PPGECC.

1.8. Estratégia

Para esse trabalho o método de pesquisa utilizado será experimental.

1.8.1. Unidade de análise

A unidade de análise deste trabalho é o concreto betuminoso usinado à quente fabricado com substituição de agregado graúdo natural por agregado reciclado de concreto graúdo (ARCg).

1.8.2. Delimitação do trabalho

O presente trabalho se delimita a estudar apenas CBUQ, que é o tipo de revestimento para pavimentação mais utilizado no Brasil, e a substituição, em variados percentuais, apenas da fração graúda de agregado natural por agregado reciclado de concreto.

1.8.3. Método de análise de dados

Como se trata de um experimento com análise quantitativa, foi adotado o método estatístico para avaliar os dados, utilizando-se análise de variância, tabela ANOVA, comparação múltipla de médias, além de desvio padrão e média para comparar e calcular os parâmetros.

1.9. Organização do trabalho

Essa dissertação de mestrado está organizada em cinco capítulos.

Inicialmente, o capítulo 1 INTRODUÇÃO apresenta uma visão geral sobre a importância da construção civil no Brasil, o panorama atual das rodovias no Brasil e a importância da sustentabilidade aliada à reciclagem de resíduos da construção civil. Os subitens deste primeiro capítulo citam o problema e a relevância da

1. INTRODUÇÃO

pesquisa, os objetivos, a justificativa do estudo, a contextualização no programa, as estratégias e a organização do trabalho.

Na sequência, no capítulo 2, referente à REVISÃO BIBLIOGRÁFICA, são abordados temas relacionados à gestão, processos para a reciclagem, normatização e classificação de resíduos de construção civil, além da utilização de agregado originado de resíduos em bases e sub-bases, que se trata de uma prática já consolidada tanto no Brasil quanto no mundo, bem como na utilização em concreto betuminoso usinado a quente.

O capítulo 3 apresenta o PROGRAMA EXPERIMENTAL, descreve a origem do ligante e de todos os agregados selecionados para utilização nesta pesquisa, apresentando os métodos de ensaios utilizados para a caracterização de tais materiais. São apresentados os ruídos do processo e os fatores variáveis, além de definidas as variáveis que seriam relevantes e adequadas para os objetivos propostos, de modo a delimitar o universo de estudo. É apresentada e definida uma única curva granulométrica para todas as misturas asfálticas estudadas. São sucintamente descritos os métodos de dosagem Marshall, o ensaio RICE para determinação densidade máxima medida, o ensaio de deformação permanente através da mesa compactadora e simulador de tráfego LCPC e o ensaio de resistência da mistura asfáltica compactada ao dano por umidade induzida (ensaio Lottman). Por último, é apresentada uma tabela com o alvo desejado para as propriedades mecânicas estudadas.

O capítulo 4 compreende a APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS dos ensaios realizados nos agregados utilizados na pesquisa e nos concretos betuminosos usinados a quente executados, além de apresentação dos custos e análise de viabilidade das misturas estudadas. Para uma melhor visualização e interpretação, os resultados são apresentados em forma de gráficos e tabelas.

Por fim, o capítulo 5 traz as CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados temas relacionados à gestão, processos para a reciclagem, normatização e classificação de resíduos de construção civil, além da utilização de agregado originado de resíduos em bases e sub-bases, que se trata de uma prática já consolidada tanto no Brasil quanto no mundo, bem como na utilização em concreto betuminoso usinado a quente.

2.1. Gestão de resíduos de construção civil

John e Agopyan (2000) esclarecem que a reciclagem de resíduo de construção e demolição vem da Antiguidade, sendo que recentemente foi empregada na reconstrução da Europa após a segunda guerra mundial e atualmente é amplamente praticada na Europa, especialmente na Holanda. Os autores também afirmam que a massa de resíduos de construção gerada nas cidades é igual ou maior que a massa de resíduos domiciliar.

Um dos precursores do uso de resíduos de construção civil é a Alemanha (MARINHO, 2011).

No Brasil, pode-se dizer que a reciclagem de resíduos de construção e demolição provém dos anos 60, 70 e 80 quando, no Rio de Janeiro, várias empresas atuavam demolindo residências e prédios do chamado Rio antigo, como a Rio Novo Demolições Ltda., e conseguiram com isso criar mão de obra capaz de aproveitar os materiais provenientes da demolição, como telhas, madeiramento do telhado, portas, janelas, assoalhos, acabamentos, cerâmicas antigas e tijolos, que eram então vendidos e geravam a principal fonte de renda das empresas, que cobravam valores pequenos pelo serviço de demolição e, como grande parte do material demolido nesse período no Rio de Janeiro foi reutilizado em novas construções, subentende-se que esses profissionais iniciaram a escola da reciclagem no país (AFFONSO, 2005).

Com o incremento do consumo decorrente da intensa industrialização e do crescimento populacional, que teve um incremento acelerado, passando de 15% para 50% desde o início do século 20, os resíduos se transformaram em graves problemas urbanos, principalmente a partir dos anos 80 (MARINHO, 2011).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Lima (1999), o agregado obtido a partir da reciclagem de resíduo de construção pode ser aplicado em serviços tais como: argamassa de assentamento e revestimento, concreto, fabricação de pré-moldados (blocos, briquetes, meio-fio e outros) e serviços de drenagem.

Podem-se melhorar as características das argamassas com a substituição total ou parcial de agregados naturais por agregados reciclados, além disso, o uso em bases e sub-bases de pavimentação vem sendo um dos mais aplicados, obtendo-se ótimos resultados e consumindo-se quantidades significativas de resíduos (SILVA, 2009).

2.1.1. Situação Internacional

Finlândia: Silva (2009) esclarece que no período de 1988 a 1992, foram produzidas, por ano, cerca de 350.000 toneladas de agregados reciclados, utilizados, quase que em sua totalidade em sub-bases e bases de pavimentos.

Japão: De acordo com Leite (2001), dois terços do resíduo de concreto demolido já é utilizado para pavimentação de rodovias neste país. Vásquez e Barra (2000) *apud* Leite (2001) comentam que no Japão já existe um plano para que seja estimulado o uso deste resíduo para produção de novos concretos.

Affonso (2005) aponta que, em 1990, 25,4 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição foram gerados, sendo que 48% deste total foram reutilizados ou reciclados. Quebaud (1996) *apud* Affonso (2005), menciona que parte destes agregados reciclados foram usados para aterrar grandes áreas no mar, conquistando extensas áreas para uso urbano. Para chegar nessa marca, no entanto, desde 1977 o Japão dispõe de normas técnicas para o uso de agregados e de concretos reciclados, inclusive classificando-os pela densidade, para emprego em concreto e bases de pavimentos (SILVA, 2009).

Uchikawa e Hanehara (1996) apontam que em 1992 foram produzidos no Japão 86 milhões de toneladas de resíduos de construção, sendo que 19 milhões de toneladas, ou seja, 34% dos resíduos, tratavam-se de resíduos de concreto, correspondente a 3,5% do total da produção anual de concreto, igual a 540 milhões de toneladas. Os autores esclarecem que grande parte dos resíduos de concreto foram utilizados para leito e subleito de rodovias e, além disso, demonstram

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

preocupação com o futuro, com relação à depredação de pedreiras de agregados naturais, o aumento do custo de aterros para disposição do material e a proteção do meio ambiente. Os autores previram para um futuro próximo o aumento no consumo de concreto, aumentando também a quantidade de resíduos, seguindo a mesma proporção.

Bathia e Chan (2000), citados por Leite (2001), confirmaram as expectativas de Uchikawa e Hanehara (1996). Os resíduos de concreto aumentaram para 71 milhões de toneladas em 1995 e esperava-se, para 2001, um volume igual a 110 milhões de toneladas de resíduos de concreto.

EUA: No final da década de 1960 o país já dispunha de política específica para resíduos, chamada de Resource Conservation and Recovering Act (RCRA) (JOHN; AGOPYAN, 2000). Após 1982, as normas ASTM C33:1982 e ASTM C125:1979 criam condições para o reuso de resíduos de construção e demolição em pavimentos e concretos (AFFONSO, 2005).

De acordo com Donovan (1991), citado por Pinto (1999), os relatórios da EPA. – Agência de Proteção Ambiental dos EUA apresentam enfoques diversificados: em 1986 foi estimada a geração anual de 31,5 milhões de toneladas de RCD nos EUA, já os relatórios de 1988, 1990 e 1992 não fazem referência aos RCD (THE SOLID WASTE ASSOCIATION OF NORTH AMERICA - SWANA, 1993), suscitando em especialistas opiniões de que a Agência não considerava tais resíduos como parte dos RSU, sendo que os RCD só voltaram a ser analisados no relatório de 1996, traçando-se uma estimativa de geração nacional de 136 milhões de toneladas, que provocou reações.

No período de 1986 a 1996 nos EUA, houve um incremento de 430% na geração de RCD (DONOVAN, 1991 *apud* PINTO, 1999).

Fernandes (2004) explica que segundo o Report Nº EPA530-R-98-010 publicado em junho de 1998 pela U.S. Environmental Protection Agency Municipal and Industrial Solid Waste Division Office of Solid Waste, estima-se que nos EUA foram gerados, no ano de 1996, 136 milhões de toneladas de RCD, conforme Tabela 2.1, sendo:

1. 43% dos resíduos de origem residencial (58 milhões t/ano) e 57% de origem não residencial (78 milhões t/ano);

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2. 48% referente a demolições de edifícios, 44% referente a reformas prediais e 8% em canteiros de obra.

Na Tabela 2.1 não estão incluídos os resíduos relativos a rodovias, pontes e limpeza de terreno.

Tabela 2.1 – Resumo da geração estimada de RCD nos EUA em 1996 (REPORT Nº EPA530-R-98-010, 1998 apud FERNANDES, 2004).

Origem	Residencial		Não-residencial		Total	
	(x10 ³ t)	(%)	(x10 ³ t)	(%)	(x10 ³ t)	(%)
Construção	6560	11	4270	6	10830	8
Reforma	31900	55	28000	36	59900	44
Demolição	19700	34	45100	58	61800	48
Total	58160	100	77370	100	135530	100
Percentual	43		57		100	

Dinamarca: De acordo com Silva (2009), nesse país desde 1970 pesquisa-se o emprego de agregados reciclados em concreto, mas apenas em 1990, através de uma sobretaxa para a geração desses materiais é que o governo atraiu interesse pelo seu reaproveitamento. No início da década de 90 o país já reciclava 60% dos resíduos de construção e demolição gerados, abastecendo 10% do mercado de agregados com estes produtos (NORDBERG NEWS, sd apud PINTO, 1999).

Em 1997, na Dinamarca foram gerados cerca de 2,6 milhões de toneladas/ano de resíduos de construção. Estima-se que para o ano 2000 esse valor tenha subido para 2,8 milhões de toneladas, de acordo com o Danish Environmental Protection Agency (GLAVIND; HAUGAARD, 1998 apud LEITE, 2001).

Países Baixos: Leite (2001) elucida que os Países Baixos processam integralmente o seu resíduo e também importam de outros países, visando aplicação em concreto reciclado e pavimentos de estradas e ruas. Silva (2009) esclarece que é o primeiro país a importar resíduos de construção e demolição de países vizinhos e, conseqüentemente, torna-se o primeiro país a receber pagamento para processamento de passivo de outros países. A partir da década de 80, normas e recomendações entraram em vigor nos Países Baixos (LEITE, 2001).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Alemanha: Há notícias do uso de blocos de concreto britados como agregado para novos produtos de concreto em torno de 1860 na Alemanha e os primeiros estudos sistemáticos sobre as características dos agregados reciclados têm início neste mesmo país, em 1928 (PINTO, 1999).

Apesar de a reciclagem ter iniciado na Alemanha, a atividade foi reduzida e reiniciada apenas mais tarde, quando as Alemanhas Oriental e Ocidental foram reunificadas (SILVA, 2009).

O uso significativo de agregado reciclado só veio acontecer após a Segunda Guerra Mundial, em resposta à necessidade de satisfazer a enorme demanda por materiais de construção e à necessidade de remover os escombros das cidades europeias quando a então República Federal da Alemanha herdou da guerra um volume entre 400 e 600 milhões de metros cúbicos de escombros, dos quais foram reciclados cerca de 11,5 milhões de metros cúbicos, que possibilitaram a produção de 175.000 unidades habitacionais até o ano de 1955 (SCHULZ; HENDRICKS, 1992 *apud* LEITE, 2001). Affonso (2005) aponta que apenas em 1960 é que todo volume de escombros foi processado e, além disso, a Alemanha foi o único país a desenvolver um projeto de construção de um prédio utilizando 100% de material reciclado.

Até 1996 a Alemanha já possuía 220 centrais de reciclagem de resíduos de construção e demolição (QUEBAUND, 1996 *apud* AFFONSO, 2005).

Reino Unido: O Reino Unido abastece 10% do mercado de agregados com produtos reciclados e é a política do governo ampliar essa taxa, em função do considerável potencial do mercado (COLLINS, 1998 *apud* LEITE, 2001). O país chega a reciclar e utilizar cerca de 50% do resíduo de construção e demolição em pavimentação.

Segundo Quebaund (1996), citado por Affonso (2005), até 1996 o Reino Unido já possuía 120 centrais de reciclagem de resíduos de construção e demolição na Europa.

Bélgica: De acordo com Pinto (1999), a Bélgica, com 9,84 milhões de habitantes (equivalente à população do município de São Paulo) e área de 30,52 mil km² (a mesma do estado de Alagoas), tem como obrigatória a reciclagem de

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

resíduos gerados nas atividades construtivas e de demolição, esse fato gera uma cadeia de negócios, descrita na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – A cadeia de negócios gerada pela gestão diferenciada e reciclagem de RCD na Bélgica (1) – (PINTO, 1999).

Empreendimentos	Quantidade
Centros de triagem de resíduos de construção e demolição	4
Empresas de locação de caçambas para resíduos	34
Instalações de reciclagem	47
Centrais valorizadoras de asfalto	13
Empreendimentos valorizadores de páletes em madeira	4
Empreendimentos valorizadores de metais ferrosos e não-ferrosos	23
Empresas coletoras de resíduos de vidro industrial	5
Empreendimentos valorizadores de materiais plásticos	31
Empresas coletoras de papel e papelão	16

(1) *Institut Bruxellois Pour la Gestion de L'environnement (1995).*

Em Flandres, cerca de 60% do RCD é reciclado (SILVA, 2009).

França: possui consumo anual de 400 milhões de toneladas de agregados, porém a produção de reciclado ainda é modesta, chegando a 4 milhões, ou seja, 1% do total consumido, sendo que por ano são gerados 25 milhões de toneladas de resíduos, dos quais 80% provêm de demolição, 8% da construção e 12% da restauração ou reformas (SILVA, 2009). O país definiu para o ano 2000 a meta de reciclar 50% dos RCD gerados (LAURITZEN, 1994).

Pinto (1999) relacionou a participação dos resíduos de construção e demolição com a massa total de resíduos sólidos urbanos, além de listar a taxa de geração (t/hab/ano), para diversos países, conforme Tabela 2.3.

Pinto (1999) também compara os preços dos agregados reciclados e naturais para diversos países da Comunidade Europeia, conforme Tabela 2.4. Observa-se que, em todos os países analisados, o agregado reciclado é mais barato que o agregado natural.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tabela 2.3 – Participação dos RCD nos RSU e taxa de geração em localidades diversas (PINTO, 1999).

Localidades	Participação dos RCD na massa total de RSU	Taxa de geração (t/hab/ano)
Europa Ocidental (1)	~66%	0,7 a 1,0
Suíça (2)	~45%	~0,45 (*)
Alemanha (3)	~60%	-
Região Bruxelas – Bélgica (4)	~66%	-
EUA (5)	39%	-
Vermont State (EUA) (6)	48%	-
Japão (7)	-	~0,68 (**)
Hong-Kong (7)	-	~1,50 (**)

(1) Conforme B.P.Simons, *Belgian Building Research Institute* apud Lauritzen (1994).

(2) MILANI (1990).

(3) Internationale Vereinigung Baustoff – Recycling – IVBR.

(4) Institut Bruxellois Pour la Gestion de L'environnement (1995).

(5) C&D Debris Recycling (1998b).

(6) Donovan (1991).

(7) Hong Kong (1993).

(*) Percentual em revisão, C&D Debris Recycling (1998c).

(**) População conforme The Times (1994).

Tabela 2.4 – Gestão de RCD na Comunidade Europeia comparativamente aos valores praticados em São Paulo. Custos e preços em Euro/t (1)(2) (PINTO, 1999).

Localidade	Custo disposição	Custo transporte	Custo reciclagem	Preço Agreg. Reciclado	Preço Agreg. Natural
Bélgica	5,90	2,65	3,57	5,95	7,14
Dinamarca	35,31	6,31	5,36	5,23	6,49
França	2,87	2,87	5,02	7,17	4,30
Alemanha	24,02	7,30	5,88	5,88	6,37
Irlanda	1,32	3,95	-	-	5,42
Itália	0,98	2,27	2,43	3,24	4,54
Holanda	26,09	2,61	6,52	5,43	7,61
Espanha	0,78	6,21	2,95	4,27	5,82
Reino Unido	3,52	4,23	3,52	7,04	8,45
São Paulo / Brasil	1,50	3,76	2,71	-	7,22

(1) IVBR (1995).

(2) Cotação do Banco Central para o Euro em 16/07/1999 – R\$1,847.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Affonso (2005) lista a quantidade de usinas na Europa, de acordo Quebaud (1996), conforme Tabela 2.5, que apresenta muito divergência. O autor esclarece que apenas em cidades com mais de um milhão de habitantes, com produção de RCD acima de 150.000 toneladas por ano, a instalação de uma usina se torna rentável, motivo pelo qual as usinas estão localizadas nos grandes centros, para economia de transporte, sendo os resíduos processados e consumidos na própria cidade. O autor também justifica a grande quantidade de usinas, e mostra que ao invés de se optar por uma grande central, várias pequenas centrais estrategicamente distribuídas são utilizadas, não só para o envio do RCD como para a devolução do material já processado ao mercado, reduzindo o custo de transportes.

*Tabela 2.5 – Quantidade de usinas de RCD na Europa segundo Quebaud.
(AFFONSO, 2005).*

Usinas de Reciclagem	
País	Quantidade
Alemanha	220
Reino Unido	120
Países Baixos	70
Bélgica	60
França	50
Itália	43
Dinamarca	20

Motta e Fernandes (2003) citados por Affonso (2005) apresentam o percentual reaproveitado e depositado em aterros para diversos países, conforme Tabela 2.6.

John e Agopyan (2000) realizaram estimativas de geração de resíduos de construção civil, conforme Tabela 2.7. Os autores explicam que é possível observar a grande variabilidade das estimativas apresentadas por diferentes fontes para um mesmo país, sendo uma das razões para tal a classificação do que é considerado resíduo de construção, já que alguns autores incluem a remoção de solos, enquanto outros excluem este valor.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tabela 2.6 – Reaproveitamento de RCD em alguns países (MOTTA E FERNANDES, 2003 apud AFFONSO, 2005).

Geração de entulho sólido			
País	Entulho (mil t/mês)	% Reutilização	% Depositado em aterros
Alemanha	59	17	83
Inglaterra	30	45	55
França	24	15	85
Itália	20	9	91
Espanha	3	<5	>95
Holanda	11	90	10
Bélgica	7	87	13
Áustria	5	41	59
Portugal	3	<5	>95
Dinamarca	3	81	19
Grécia	2	<5	>95
Suécia	2	21	79
Finlândia	1	45	55
Irlanda	1	<5	>95
Total/Média	180	28	72

Tabela 2.7 – Estimativas de geração de resíduos de construção civil (JOHN; AGOPYAN, 2000).

País	Quantidade Anual		Fonte
	Mil t/ano)	kg/hab	
Suécia	1,2 – 6	136 – 680	TOLSTOY; BORKLUND; CARLSON (1998); EU (1999)
Holanda	12,8 – 20,2	820 – 1300	LAURITZEN (1998); BROSSINK; BROWERS; VAN KESSEL (1996); EU (1999)
EUA	136 – 171	463 – 584	EPA (1998); PENG, GROSSKOPF, KIBERT (1994)
UK	50 – 70	880 – 1120	DETR (1998); LAURITZEN (1998)
Bélgica	7,5 – 34,7	735 – 3359	LAURITZEN (1998); EU (1999)
Dinamarca	2,3 – 10,7	440 – 2010	
Itália	35 – 40	600 – 690	
Alemanha	79 – 300	963 – 3658	
Japão	99	785	KASSAI (1998)
Portugal	3,2	325	EU (1999)
Brasil	Na	230 – 660	PINTO (1999)

Os exemplos mostram que apenas por necessidade ou através de políticas de taxaço é possível implementar o uso efetivo dos produtos de reciclagem dos

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

resíduos de construção e demolição e, pelos dados apresentados, observa-se que a condição de reciclagem e aplicação de RCD é muito variável de país para país, mesmo entre os países desenvolvidos, sendo que as principais aplicações do material reciclado são pavimentação e fabricação de concreto, embora sejam mencionados ainda outras aplicações como a fabricação de tijolos, meio fios e canaletas (AFFONSO, 2005).

2.1.2. Situação Nacional

Apenas 20% a 30% do resíduo gerado no Brasil vêm sendo destinado à reciclagem, destacando-se materiais como concreto, asfalto, metais e madeira (FERNANDES, 2004).

Affonso (2005) aponta várias informações contraditórias a respeito do volume de RCD gerados no Brasil, de acordo com o autor são três quantidades diferentes, conforme segue:

- Carneiro *et al.* (2001) no livro Entulho Bom, estima que cerca de 70% em massa do total de resíduos sólidos urbanos coletados em cidades de médio e grande porte são RCD;

- Lima e Silva (1999) *apud* Leite (2001), estimam que a geração de RCD se situa entre 0,4 a 0,7 toneladas por habitante por ano;

- Affonso (2005) organizou informações pesquisadas por Leite (2001) e Nunes (2004) a respeito da produção de RCD de algumas cidades brasileiras, conforme a Tabela 2.8.

Dados mais recentes apontam que os RCD podem representar de 50 a 70% da massa de resíduos sólidos urbanos (BRASIL, 2011).

É possível observar muita discrepância nos valores apresentados, especialmente para a cidade do Rio de Janeiro com relação à outras capitais de porte similar. Affonso (2005) esclarece que esse resultado não indica uma melhor performance para a cidade do Rio de Janeiro, mas sim que grande parte do resíduo gerado não aparece nas estatísticas oficiais, sendo desviado para aterros clandestinos, como por exemplo o aterro da Lagoa de Jacarepaguá, próximo à comunidade Rio das Pedras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tabela 2.8 – Produção de RCD em algumas cidades brasileiras (AFFONSO, 2005).

Nº	Local	População (milhões de habitantes)	Geração de entulho (ton/dia)	% entulho em relação ao RSU	Produção de entulho (kg/hab/dia)	Fonte
1	São Paulo	15	5000	ND	0,33	LEITE (2001)
2	Porto Alegre	1,2	300	ND	0,29	LEITE (2001)
3	Salvador	2,2	2750	50	1,25	NUNES (2004)
4	Ribeirão Preto	0,46	1043	67	2,27	LEITE (2001)
5	São José do Rio Preto	0,32	687	ND	2,15	LEITE (2001)
6	Jundiaí	0,29	712	ND	2,46	LEITE (2001)
7	Santo André	0,63	1013	58	1,61	LEITE (2001)
8	Belo Horizonte	2,01	1200	51	0,6	LEITE (2001)
9	Vitória da Conquista	0,24	310	ND	1,29	LEITE (2001)
10	São José dos Campos	0,5	733	65	1,47	LEITE (2001)
11	Rio de Janeiro	5,9	863	19	0,14	NUNES (2004)

Tabela 2.9 – Geração estimada de entulho produzidos no país e no exterior (ZORDAN, 1997).

Local gerador		Geração estimada (t/mês)
Brasil (1)	São Paulo	372000
	Rio de Janeiro	27000
	Brasília	85000
	Belo Horizonte	102000
	Porto Alegre	58000
	Salvador	44000
	Recife	18000
	Curitiba	74000
	Fortaleza	50000
	Florianópolis	33000
Europa (2)	-	16000 – 25000
Reino Unido (3)	-	6000
Japão (3)	-	7000

(1) Pinto (1987).

(2) Pera (1996).

(3) Cib (1998).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Zordan (1997) estimou a quantidade de entulho produzido no país e no exterior, conforme Tabela 2.9.

Através de novas construções, reformas ou demolições daquelas já existentes, gera-se RCD que compõe a maior parte do lixo dos grandes centros urbanos. Em Salvador, por exemplo, são coletados cerca de 2750 t/dia de RCD, ou seja, 50% de todo o lixo dessa capital (CASSA *et al.*, 2001).

A quantidade estimada coletada de RCD é de 99.354 t/dia (BRASIL, 2011), sendo que para as diferentes regiões a quantidade coletada está apresentada na Figura 2.1.

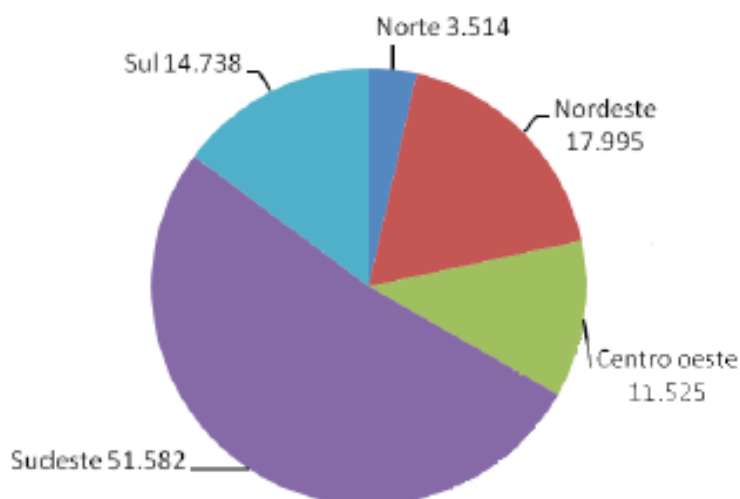


Figura 2.1 – Estimativa de RCD coletada nas diferentes regiões do Brasil (t/dia) (BRASIL, 2011).

Pinto (1999) pesquisou a participação percentual dos resíduos de construção e demolição (RCD) no conjunto de resíduos sólidos urbanos (RSU), composto por resíduos domiciliares e outros tipos de resíduos, como industriais, provenientes de serviços de saúde, solo e podas, para os municípios de Santo André, São José do Rio Preto, São José dos Campos, Ribeirão Preto, Jundiaí, todos em São Paulo, e Vitória da conquista, na Bahia, e chegou aos valores apresentados na Tabela 2.10 e na Figura 2.2.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tabela 2.10 – Composição dos RSU nos municípios pesquisados (PINTO, 1999).

Informações (1)	Municípios					
	Santo André (base 96)	São José R. Preto (base 96)	São José Campos (base 95)	Ribeirão Preto (base 95)	Jundiaí (base 96)	Vitória da Conquista (base 97)
Provável geração total de RCD (t/dia)	1013	687	733	1043	712	310
Geração de resíduos domiciliares (t/dia)	674	302	278	257	314	130
Geração de outros resíduos (industriais, saúde, volumosos, solo, podas) (t/dia)	181	198 ²	79	186	125	72
Geração total de RSU (t/dia)	1868	1187	1090	1484	1151	512

(1) 26 dias úteis/ mês.

(2) Exclusão dos resíduos industriais.

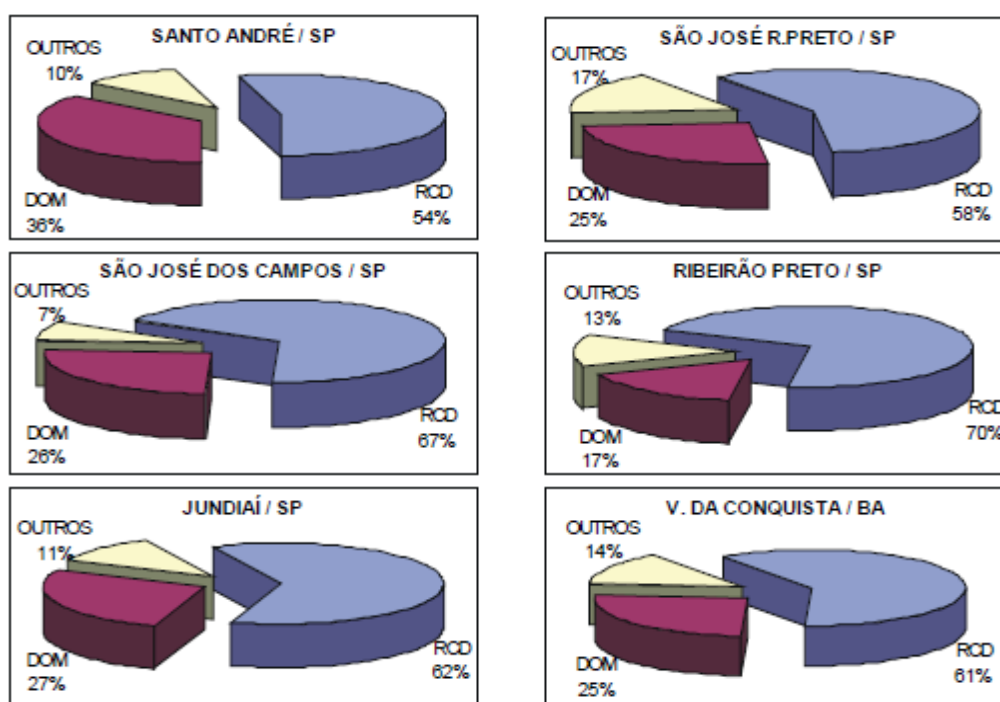


Figura 2.2 – Participação dos RCD na totalidade dos RSU gerados nos municípios pesquisado (PINTO, 1999).

Muito oportunamente, Pinto (1999) comparou os resultados obtidos com dados de outras pesquisas realizadas para municípios brasileiros e também para alguns países desenvolvidos, ambos disponíveis em bibliografia, conforme Tabela 2.11.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tabela 2.11 – Participação dos RCD nos RSU e taxa de geração em localidades diversas (PINTO, 1999).

Localidades	Participação dos RCD na massa total de RSU	Taxa de geração (t/hab/ano)
Santo André/ SP	54%	0,51
São José do Rio Preto/ SP	58%	0,66
São José dos Campos/ SP	67%	0,47
Ribeirão Preto/ SP	70%	0,71
Jundiaí/ SP	62%	0,76
Vitória da Conquista/ BA	61%	0,40
Belo Horizonte/ MG (1)	54%	0,34
Campinas/ SP (2)	64%	0,62
Salvador/ BA (3)	41%	0,23
Europa Ocidental (1)	~66%	0,7 a 1,0
Suíça (2)	~45%	~0,45 (*)
Alemanha (3)	~60%	-
Região Bruxelas – Bélgica (4)	~66%	-
EUA (5)	39%	-
Vermont State (EUA) (6)	48%	-
Japão (7)	-	~0,68 (**)
Hong-Kong (7)	-	~1,50 (**)

(1) Considerados apenas RCD dispostos em aterro público – abril 1999 (Superintendência de limpeza urbana, SLU 1999).

(2) Paulella e Scapim (1996).

(3) Considerados apenas RCD dispostos em aterro público (Empresa de limpeza urbana de Salvador – LIMPURB 1999).

(4) Conforme B.P.SIMONS, Belgian Building Research Institute apud LAURITZEN, 1994.

(5) MILANI, 1990.

(6) Internationale Vereinigung Baustoff – Recycling – IVBR, s.d.

(7) Institut Bruxellois Pour la Gestion de L'environnement, 1995.

(8) C&D Debris Recycling, 1998b.

(9) DONOVAN, 1991.

(10) HONG KONG, 1993.

(*) Percentual em revisão (C&D Debris Recycling, 1998c).

(**) População conforme The Times, 1994.

A geração de RCD em algumas cidades brasileiras é estimada em 0,50 t/ano/habitante (BRASIL, 2011).

John e Agopyan (2000) obtiveram uma mediana dos dados obtidos por Pinto (1999) igual à 0,51 t/hab.ano, considerando o ano com 300 dias úteis. Os autores

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

elaboraram uma tabela com os resultados, replicada neste trabalho como Tabela 2.12, e chegaram à conclusão que das 4974 áreas urbanas, 152 apresentam geração estimada de resíduo acima de 200 toneladas por dia útil e é nesses municípios, com mais de 120 mil habitantes, que residem 56% da população brasileira. Como regra geral, quanto maior a cidade, mais grave o problema de RCD.

Tabela 2.12 – Classificação dos municípios brasileiros de acordo com a geração de RCD pela população urbana (JOHN; AGOPYAN, 2000).

População (mil)	RCD (t/dia útil)	Nº mun	População		RCD médio (t/dia)
			%	Média	
<120	<200	4822	44,2	11281	18
120 – 300	200 – 500	103	16,0	190873	318
300 – 600	500 – 1000	25	8,3	410865	684
600 – 3000	1000 – 5000	22	19,3	1082086	1803
>3000	>5000	2	12,1	7471325	12452

Ainda para agravar a situação, grande parte desses resíduos é depositada irregularmente. Pinto (1999) estima que a deposição irregular fica entre 10 a 47% do total de resíduos gerados. Sabe-se que os resíduos depositados podem causar o entupimento da rede de água pluvial, podendo causar enchentes e proliferação de vetores nocivos à saúde e também causam a degradação do ambiente urbano.

Pinto (1999) verificou a distribuição da ocorrência de vetores em áreas de descarte de RCD em São José do Rio Preto, conforme Tabela 2.13.

Tabela 2.13 – Distribuição da ocorrência de vetores em áreas com descarte de RCD em São José do Rio Preto (PINTO, 1999).

Vetores	Participação
Pulgas, carrapatos, piolhos e percevejos	51,3%
Escorpiões	25,7%
Ratos	9,5%
Baratas	8,1%
Moscas	5,4%

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

John e Agopyan (2000) apontam para a gravidade do aceite de resíduos por parte de proprietários de imóveis que os empregam como aterro, normalmente sem maiores preocupações com o controle técnico do processo, podendo, tal prática, gerar problemas futuros nas construções erguidas nestas áreas, quando não acidentes graves, como o da Favela Nova República, em São Paulo, onde o desabamento de um aterro com resíduo de construção causou a morte de várias pessoas.

Além dos problemas citados, a disposição irregular dos resíduos também tem o custo social, decorrente de uma gestão corretiva, que pode vir a onerar os cofres públicos. São despesas provenientes da remoção dos resíduos dos locais de descarte indevido e o seu aterramento em local apropriado. De acordo com Pinto (1999) esses custos podem variar em função do método de remoção e podem ficar entre 5,37 e 14,78 dólares por tonelada.

De acordo com a Superintendência de Limpeza Urbana (SLU) de Belo Horizonte/MG, citada por Marinho (2011), em 2008, foram recolhidas em média 741.400 toneladas de RCD. Deste total, 78.000 toneladas coletadas em locais clandestinos. Segundo o setor de estatística da SLU, o custo de recolhimento do RCD disposto em locais clandestinos, em abril de 2009, era de R\$ 23,53/tonelada para coletas mecanizadas e R\$ 99,13/t para coletas manuais, em locais de difícil acesso para as máquinas.

Pinto (1989), citado por Zordan (1999), estudou a composição média da fração mineral do entulho para duas localidades diferentes, conforme Tabela 2.14.

Tabela 2.14 – Composição média da fração mineral do entulho (%) (ZORDAN, 1999).

Material	Composição média da fração mineral do entulho (%)	
	PINTO (1989) (1)	ZORDAN e PAULON (1997) (2)
Argamassa	64,4	37,6
Concreto	4,8	21,2
Material Cerâmico	29,4	23,4
Pedras	1,4	17,8

(1) Cidade de São Carlos, SP, Brasil.

(2) Cidade de Ribeirão Preto, SP, Brasil.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com Leite (2001), no Brasil, o primeiro estudo sistemático para a utilização de resíduos de construção e demolição foi concluído por Pinto (1986), porém, a reciclagem de resíduos de construção teve início efetivo no país em 1991, em Belo Horizonte.

De acordo com Affonso (2005), Belo Horizonte é a capital que mais utiliza material reciclado onde, apesar da ausência de normas técnicas, a prefeitura conseguiu desenvolver metodologia para utilizar os resíduos reciclados em bases de ruas e estradas, criando também uma central de pré-moldados para a confecção de peças para uso na própria cidade.

A utilização de resíduos de construção civil em camadas de pavimento tem sido uma experiência bem sucedida na cidade de Belo Horizonte, onde, desde 1996 até julho de 2001, foram utilizadas 136.840 toneladas de resíduos, num total de 271 ruas implantadas e reconstruídas, totalizando 400km de ruas, segundo a Secretaria de Serviços Urbanos da Prefeitura Municipal (DIAS, 2004).

De acordo com Nunes (2004), dos 5.507 municípios brasileiros, apenas 2% tem algum tipo de tratamento de RCD.

No Brasil, 124 municípios adotam a triagem simples dos RCD reaproveitáveis (classes A e B); 14 realizam a triagem e trituração simples dos resíduos classe A; 20 realizam a triagem e trituração dos resíduos classe A, com classificação granulométrica dos agregados reciclados; 79 fazem o reaproveitamento dos agregados produzidos na fabricação de componentes construtivos e 204 adotam outras formas (BRASIL, 2011).

Tabela 2.15 – Usinas de reciclagem implantadas no Brasil até novembro de 2008 (MIRANDA et al., 2009).

Cidade	Propriedade	Instalação	Capac. (t/h)	Situação
São Paulo/SP	Prefeitura	1991	100	Desativada
Londrina/PR	Prefeitura	1993	20	Desativada
Belo Horizonte/MG (Estoril)	Prefeitura	1994	30	Operando
Belo Horizonte/MG (Pampulha)	Prefeitura	1996	20	Operando
Ribeirão Preto/SP	Prefeitura	1996	30	Operando
Piracicaba/SP	Autarquia/Emdhap	1996	15	Operando
São José dos Campos/SP	Prefeitura	1997	30	Desativada

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Continuação da Tabela 2.15 – Usinas de reciclagem implantadas no Brasil até novembro de 2008 (MIRANDA et al., 2009).

Cidade	Propriedade	Instalação	Capac. (t/h)	Situação
Muriaé/MG	Prefeitura	1997	8	Desativada
São Paulo/SP	ATT Base	1998	15	Desativada
Macaé/RJ	Prefeitura	1998	8	Desativada
São Sebastião/DF	Adm. Regional	1999	5	Desativada
Socorro/SP	Irmãos Preto	2000	3	Operando
Guarulhos/SP	Prefeitura/Proguaru	2000	15	Operando
Vinhedo/SP	Prefeitura	2000	15	Operando
Brasília/DF	Caenge	2001	30	Operando
Fortaleza/CE	Usifort	2002	60	Operando
Ribeirão Pires/SP	Prefeitura	2003	15	Desativada
Ciriaco/RS	Prefeitura	2003	15	Desativada
São Gonçalo/RJ	Prefeitura	2004	35	Paralisada
Jundiaí/SP	SMR	2004	20	Operando
Campinas/SP	Prefeitura	2004	70	Operando
São Bernardo do Campo/SP	Urbem	2005	50	Operando
São Bernardo do Campo/SP	Ecofort	2005	70	Desativada
São José do Rio Preto/SP	Prefeitura	2005	30	Operando
São Carlos/SP	Prefeitura/Prohab	2005	20	Operando
Belo Horizonte/MG (BR 040)	Prefeitura	2006	40	Operando
Ponta Grossa/PR	P. Grossa Amb.	2006	20	Operando
Taboão da Serra/SP	Estação Ecologia	2006	20	Operando
João Pessoa/PB(*)	Prefeitura/Emlur	2007	25	Operando
Caraguatatuba/SP	JC	2007	15	Operando
Colombo/PR	Soliforte	2007	40	Operando
Limeira/SP	RL Reciclagem	2007	35	Operando
Americana/SP	Cemara	2007	25	Operando
Piracicaba/SP	Autarquia/Semae	2007	20	Operando
Santa Maria/RS	GR2	2007	15	Operando
Osasco/SP	Inst. Nova Agora	2007	25	Instalando
Rio das Ostras/RJ	Prefeitura	2007	20	Instalando
Brasília/DF	Caenge	2008	30	Operando
Londrina/PR	Kurica Ambiental	2008	40	Operando
São Luís/MA	Limpel	2008	40	Operando
São José dos Campos/SP	RCD Ambiental	2008	70	Operando
Paulínia/SP	Estre Ambiental	2008	100	Operando
Guarulhos/SP	Henfer	2008	30	Instalando
Barretos/SP	Prefeitura	2008	25	Instalando
São José dos Campos/SP	Julix/Enterpa	2008	25	Instalando
Petrolina/PE	Prefeitura	2008	25	Instalando
Itaquaquetuba/SP	Entrec Ambiental	2008	40	Instalando

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A Tabela 2.15 apresenta informações de algumas usinas implantadas no país até novembro de 2008 (MIRANDA *et al.*, 2009).

2.2. Processos para a reciclagem dos resíduos de construção civil

Marinho (2011) explica que os equipamentos e o processo de reciclagem nas usinas afetam diretamente as características dos agregados reciclados, tais como: granulometria, forma e resistência dos grãos, teor de impurezas e composição, podendo gerar diferentes materiais.

Miranda *et al.* (2009) descrevem que, com relação ao processo de britagem, quase todas as usinas são muito semelhantes, sendo compostas dos seguintes equipamentos: pá, carregadeira ou retroescavadeira, alimentador vibratório, transportadores de correia, britador de mandíbula ou impacto, separador magnético permanente ou eletroímã e peneira vibratória.

Antes do processo propriamente dito da britagem é realizada uma operação de triagem, podendo ser manual ou mecânica, onde o resíduo passa por uma seleção, buscando-se remover e materiais indesejáveis ou contaminantes, tais como papel, plástico, madeira, gesso, amianto e solo (MIRANDA *et al.*, 2009).

Após a britagem, de acordo com o apresentado por Miranda e Selmo (1999), é recomendado o processo de lavagem em classificador espiral e formação de pilhas de homogeneização, que apresentou para um estudo realizado com argamassa excelente eficiência na redução de variabilidade, melhoria da qualidade da areia reciclada, remoção do excesso de finos e de contaminantes leves e baixo custo de investimento.

2.2.1. Britadores de impacto

De acordo com Lima (1999), o britador de impacto, vide Figura 2.3, é um dos equipamentos mais utilizados nas usinas de reciclagem brasileiras e possui como vantagem baixa emissão de ruídos, além de permitir o processamento de peças de concreto armado, devido à sua robustez.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Silva (2009) explica que, neste equipamento, o resíduo é britado em uma câmara de impacto, pelo choque com martelos maciços, fixados a um rotor e pelo choque com placas de impacto fixas.

Lima (1999) complementa que nesse tipo de britagem o processo de quebra das partículas ocorre por impacto, e, devido a isso, os grãos se partem nas linhas naturais de ruptura, gerando partículas mais íntegras, com boas características mecânicas, além da britagem do material ocorrer por colisão em placas fixas de impacto, gerando grãos de formato mais cúbico, com granulometria bastante apropriada para o uso em pavimentação.

Hansen (1992) *apud* Lima (1999), afirma que é o equipamento mais adequado à produção de agregado reciclado para uso em pavimentação, consoante com a afirmação de Marinho (2011) que aponta o agregado fabricado em britadores de impacto como com granulometria bastante apropriada para o uso em pavimentação.

Outra vantagem proporcionada por esse tipo de equipamento é a alta redução das dimensões das peças britadas, com geração de boa porcentagem de finos, muitas vezes dispensando a rebitagem do material (SILVA, 2009).

Porém, esse tipo de equipamento possui como desvantagens o alto custo de manutenção, pois os martelos e placas de impacto necessitam de trocas periódicas, além da poeira que normalmente causa (MIRANDA, 2005).



Figura 2.3 – Detalhe de britador de impacto da usina Urbem, em São Bernardo do Campo/SP (MIRANDA, 2011).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.2.2. Britador de mandíbula

Miranda (2005) aponta que o britador de mandíbula, vide Figura 2.4, gera maior quantidade de grãos graúdos, geralmente sendo necessário uma britagem secundária, além disso, gera grãos de formato lamelar, mais fracos, com linhas de fratura muito pronunciadas.

O processo de fragmentação ocorre por compressão (esmagamento), por isso é indicado para produzir agregados reciclados que apresentam desgaste relativamente alto, não sendo indicados para uso em pavimentação (LUZ *et al.*, 2010).

Apresenta como desvantagens (SILVA, 2009):

- geração de alta porcentagem de graúdos, não sendo usado como único equipamento de britagem ou em recicladores em que o material não é rebitado;
- geração de grãos lamelares, com tendência à baixa qualidade, por apresentarem linhas de fratura muito pronunciadas, que podem gerar pontos fracos nas aplicações, como por exemplo, em vigas e pilares;

Ao contrário do britador de impacto, apresenta baixo custo de manutenção e menor emissão de poeira (MIRANDA, 2005).



Figura 2.4 – Detalhe de britador de mandíbula (MIRANDA, 2011).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.2.3. Britadores móveis

Existem ainda os britadores móveis, vide Figura 2.5, que possuem grande versatilidade, podendo ser deslocados ao próprio local da obra ou ao depósito de resíduos de construção civil, desonerando assim os custos de transporte do resíduo de construção civil até a planta fixa de reciclagem (SILVA, 2009; MARINHO, 2011).

O equipamento é montado sobre um chassi, se locomove através de esteiras laterais e possui motor a diesel, sistema hidráulico ou gerador elétrico, britador, separador magnético e esteira equipada com um braço que lança o reciclado para a pilha de estoque (MARINHO, 2011).



Figura 2.5 – Detalhe de reciclador móvel em operação (SILVA, 2009).

2.3. Normatização acerca da utilização de resíduos da construção civil na pavimentação

Pode-se verificar que diversos países, inclusive o Brasil, possuem normas acerca do aproveitamento de resíduos da construção civil, porém, quando se trata do uso do ARC em CBUQ, foco da presente pesquisa, a bibliografia é bastante escassa, quase inexistente, sendo que não foram encontradas normas específicas a respeito do uso de agregados reciclados em tal elemento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.3.1. *Normatização Internacional*

As normas ou especificações internacionais para o uso do agregado reciclado em pavimentação, citadas por pesquisas anteriores (NATAATMADJA; TAN, 2001; LEVY, 2001; MOTTA, 2005; MARINHO, 2011; HENDRICKS; JANSSEN, 2001; POON, 1997) são:

- Alemanha: Especificação Técnica Alemã – TL RC-TOB (1995): Technischen Lieferbedingungen für Recycling Baustoffe in Tragschichten ohne Bindemittel (Especificações técnicas para uso de materiais de construção reciclados em bases de pavimentos, sem ligante) – indica as condições técnicas para aplicação dos RCD para camadas de pavimentos;

- Áustria: A qualidade dos resíduos reciclados na Áustria é regulamentada pelo Guidelines for Recycled Building Materials – BRV Richtlinie für Recycling – Baustoffe (1992). Estas regulamentações foram preparadas pela Austrian Quality Protection Association for Recycled Building Materials. Os agregados aplicados em obras de pavimentação devem seguir, de modo geral, os requisitos contidos na Austrian Standards for Transport and Road Construction (Richtlinien und Vorschriften für den Strassebau – RVS). A Áustria apresenta vasta experiência na reciclagem de pavimentos de concreto de cimento Portland, pois transforma os antigos pavimentos de concreto em agregados para utilização na construção dos novos pavimentos rígidos (OECD, 1997 *apud* ALT-MAT, 1999). Não são exigidas diferenças entre os métodos de ensaio ou requisitos empregados nos materiais naturais ou reciclados;

- Itália: as especificações para o uso de agregados reciclados em obras rodoviárias estão contidas na CNR UNI Standard 10006 - Construzione e manutenzione delle strade – Tecnica di impiego delle terre (2002). Os requisitos observados são: ocorrência de materiais não pétreos, forma e heterogeneidade dos grãos;

- Austrália: Especificações Técnicas do estado de Victoria e Nova Gales do Sul / Austrália – Road Authority of Victoria – Section 820 (2006): Recycled crushed concrete for pavement subbase and light duty base – para o uso do agregado reciclado de concreto em camadas de sub-bases; RTA QA Specification 3051: Unbound and Modified Base and Subbase Materials for Surface Road Pavements;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

AUS-SPEC #2 Asset Owners Roadworks Specifications (1997). Por razões econômicas, são aproveitados grandes volumes de agregados reciclados em obras de pavimentação na Austrália. Porém, não são atendidos todos os requisitos contidos nas especificações (UTS, 1999);

- Estados Unidos: Especificações Técnicas dos Departamentos de Transporte dos estados norte-americanos (Ex.: da Flórida – FDOT; de Minnesota – Mn/DOT). Nos Estados Unidos, desde 1982, as normas ASTM C33:1982 e ASTM C125:1979 criaram condições para o uso de RCD em pavimentos e concretos. Segundo KUO *et al.* (2001), 28 estados norte-americanos permitem o emprego do agregado reciclado de concreto em camadas de base e sub-base de pavimentos, porém, apenas 15 estados possuem especificações técnicas para o uso destes agregados.

- Holanda: existe a Especificação Técnica Holandesa – Standaard RAW bepalingen (1995): Stichting Centrum voor Regelgeving en Onderzoek in de Grond-, Water- em Wegenbouw em de Verkeerstechniek – indica os requisitos necessários ao agregado reciclado (tamanho e forma dos grãos, teor de contaminantes etc.) para que seja utilizado em camadas de sub-base de pavimentos.

- Reino Unido: Norma Britânica – BS 6543 (1985) – Guide to use of industrial by-products and waste materials in building and civil engineering; Specification for Highway Works (Department of Transport, London, England, 1986) - indica uma série de aplicações para o uso do concreto britado, inclusive em base e sub-base de pavimentos.

2.3.2. Normatização nacional

2.3.2.1. Manual de pavimentação

Em consonância com o disposto na Constituição Federal, a execução de obras ou de atividades potencialmente causadoras de significativa degradação do meio ambiente - entre as quais se inclui a construção/pavimentação de estradas de rodagem com duas pistas ou mais faixas de rolamento dependerá da elaboração de Estudo de Impacto Ambiental - EIA e respectivo Relatório de Impacto ao Meio

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ambiente - RIMA, a serem submetidos à aprovação do órgão estadual competente, e ao IBAMA em caráter supletivo, o licenciamento das atividades modificadoras do meio ambiente (BRASIL, 2006).

O Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, BRASIL (2006) também enfatiza que, de acordo com a resolução CONAMA nº 001/86 o EIA - Estudo de Impacto Ambiental deverá contemplar a identificação dos impactos (esta atividade é feita considerando o empreendimento) e a definição das medidas mitigadoras e de compensação e do programa de monitorização dos impactos, com suas alternativas sobre o meio ambiente, conhecido através do diagnóstico.

Além disso, também é pontuada a questão das atividades modificadoras do meio ambiente que estão associadas às obras rodoviárias, como usinas de asfalto, extração de areia e brita e infraestrutura e obras de apoio como o canteiro de obras, alojamento e depósitos, sendo que para cada um desses casos, dependendo do porte, do período de funcionamento e da localização, pode estar sujeito ao licenciamento ou à adoção de medidas mitigadoras de impacto.

Se define poluição ou degradação ambiental como qualquer alteração das qualidades físicas, químicas ou biológicas do meio ambiente que possam: I - prejudicar a saúde ou o bem estar da população; II - criar condições adversas às atividades sociais e econômicas; III - ocasionar danos relevantes à flora, à fauna e a qualquer recurso natural; IV - ocasionar danos relevantes aos acervos histórico, cultural e paisagístico. É fato notório que a exploração de agregados pétreos altera as qualidades físicas do meio ambiente e prejudicam o bem estar da população além de causar danos aos recursos naturais do ambiente e também ocasiona danos paisagísticos, devido à alteração da paisagem que se dá com a exploração, portanto, conclui-se que a exploração de agregados pétreos causa poluição ou degradação ambiental (BRASIL, 2006).

É elucidado o caso das obras de infraestrutura rodoviária, onde o exame sistemático dos impactos ambientais tem o objetivo de avaliar desde o início os danos potenciais a serem causados ao ambiente, de formar a evitar ou mitigar os seus efeitos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.3.2.2. Associação Brasileira de Normas Técnicas

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) possui as seguintes normas vigentes no tocante ao uso de resíduos de construção civil:

- ABNT NBR 10004:2004: Resíduos sólidos – Classificação, cuja norma classifica os resíduos sólidos quanto aos seus potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente.

- ABNT NBR 10005:2007: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólido, que fixa os requisitos exigíveis para a obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, visando diferenciar os resíduos classificados pela NBR 10004 como classe I - perigosos - e classe II - não-perigosos.

- ABNT NBR 10006:2004: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos, cuja fixa os requisitos exigíveis para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos, visando diferenciar os resíduos classificados na NBR 10004 como classe II A - não-inertes - e classe II B - inertes.

- ABNT NBR 13221:2010: Transporte terrestre de resíduos, que especifica os requisitos para o transporte terrestre de resíduos, de modo a minimizar danos ao meio ambiente e a proteger a saúde pública.

- ABNT NBR 15112:2004: Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação, que fixa os requisitos exigíveis para projeto, implantação e operação de áreas de transbordo e triagem de resíduos da construção civil e resíduos volumosos.

- ABNT NBR 15113:2004: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação, que fixa os requisitos mínimos exigíveis para projeto, implantação e operação de aterros de resíduos sólidos da construção civil classe A e de resíduos inertes.

- ABNT NBR 15114:2004: Resíduos sólidos da Construção civil - Áreas de reciclagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação, cuja fixa os requisitos mínimos exigíveis para projeto, implantação e operação de áreas de reciclagem de resíduos sólidos da construção civil classe A.

- ABNT NBR 15115:2004: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos, cuja

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

estabelece os critérios para execução de camadas de reforço do subleito, sub-base e base de pavimentos, bem como camada de revestimento primário, com agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil, denominado agregado reciclado, em obras de pavimentação.

- ABNT NBR 15116:2004: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos, cuja estabelece os requisitos para o emprego de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil.

- ABNT NBR 15849:2010: Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento, cuja especifica os requisitos mínimos para localização, projeto, implantação, operação e encerramento de aterros sanitários de pequeno porte, para a disposição final de resíduos sólidos urbanos.

2.3.2.3. Resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA

A resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA (2002) esclarece que os geradores deverão ter como objetivo prioritário a não geração de resíduos e, secundariamente, a redução, a reutilização, a reciclagem e a destinação final.

De acordo com tal resolução, resíduos da construção civil são os resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha, agregado reciclado é o material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção que apresentem características técnicas para a aplicação em obras de edificação, de infraestrutura, em aterros sanitários ou outras obras de engenharia.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.4. Uso de agregado reciclado em pavimentação

De acordo com o Anuário Mineral Brasileiro do DNPM (2010), o consumo de areia e rochas britadas no Brasil em 2009 foi de aproximadamente 265 milhões e 237 milhões de toneladas, respectivamente. Além disso, observa-se no anuário que 40,71% da rocha britada – produto bruto – foi empregado na construção civil, 34,34% na construção e manutenção de estradas e 11,54% na pavimentação asfáltica. Quando se fala em produto beneficiado os percentuais se alteram para 63,73% na construção civil, 14,53% na construção e manutenção de estradas e 4,54% na pavimentação asfáltica.

Em 2003, a produção brasileira alcançou 320,4 milhões de toneladas, das quais 96 milhões de toneladas, que equivalem a 30% do mercado brasileiro foram consumidas em pavimentação (DNPM, 2004).

Marinho (2011) cita que um levantamento da Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas da Universidade de São Paulo (FIPE), para o projeto “Diretrizes para a Mineração de Areia na Região Metropolitana de São Paulo”, no qual se constatou que a construção de uma unidade básica de 35 m² consome 21 toneladas de agregados; em habitações populares, uma unidade básica de 50 m², consome 68 toneladas; um edifício público de 1.000 m², 1.360 toneladas; uma escola padrão de 1.120 m², 1.675 toneladas; em pavimentação urbana, um quilômetro de via pública com 10 metros de largura, consome entre 2.000 e 3.250 toneladas; um quilômetro de estrada vicinal, 2.800 toneladas; em uma estrada pavimentada normal, o consumo é bastante elevado, cerca de 9.500 toneladas por quilômetro executado.

Dias (2004) esclarece que a implantação e construção de 400 km de rodovias resultariam no aproveitamento de 136.840 toneladas de resíduos de construção.

Segundo Levy (2001), os agregados minerais – areia e pedra britada – constituem hoje o segmento do setor mineral mais explorado no país.

Estima-se atualmente que cerca de 27 milhões de toneladas de ligante asfáltico e meio bilhão de toneladas de agregados sejam consumidos a cada ano na construção e manutenção de rodovias nos Estados Unidos (PETERSON *et al.*, 1994). Na Europa, estima-se que o setor de pavimentação consome

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

aproximadamente um bilhão de toneladas de agregado natural por ano (HILL *et al.*, 2001).

A utilização de resíduos de construção e demolição em bases e sub-bases de pavimentos urbanos vem se consolidando como uma alternativa viável, considerando que uma camada com 20 centímetros de espessura e 8 metros de largura, após compactada, consome cerca de dois metros cúbicos de resíduos beneficiados, contribuindo, de forma significativa, não só para a redução de danos ambientais, pois é comum a utilização de depósitos clandestinos nas margens dos rios e córregos, mas também para a consolidação de políticas públicas de gestão de resíduos sólidos (MOREIRA *et al.*, 2007).

Além disso, a possibilidade de exploração dos agregados na natureza vem diminuindo gradativamente principalmente em virtude de um planejamento urbano e territorial inadequado, zoneamentos restritivos, usos competitivos do solo, problemas de sustentabilidade ambiental etc., gerando incertezas quanto às perspectivas de garantia de abastecimento futuro (MARINHO, 2011). A autora complementa que o resíduo de construção pode vir a ser uma alternativa técnica interessante, principalmente em regiões com problemas para obtenção de agregados pétreos naturais.

De acordo com a ANEPAC (2011), levando-se em conta que o transporte pode responder por cerca de 1/3 do custo final da areia e 2/3 do preço final da brita.

No caso específico de emprego do agregado reciclado para obras de base e sub-base de pavimentação, as pesquisas anteriores desenvolvidas (POON, 1997; CARNEIRO *et al.*, 2001; CHINI *et al.*, 2001; NATAATMADJA; TAN, 2001; FERNANDES, 2004; MOTTA, 2005; ABDON; BERNUCCI, 2007; LEITE, 2007; MOREIRA *et al.*, 2007; SILVA *et al.*, 2008) indicam vários benefícios:

- diminuição nos gastos com a limpeza urbana e consequente economia nos custos de operação dos aterros sanitários, dragagens de rios, limpezas de bueiros e galerias, saneamento em geral;

- menor necessidade de áreas para aterros sanitários e bota-foras, por conta do aumento da vida útil dos já existentes;

- maior facilidade para implantação dos programas municipais de gerenciamento de resíduos sólidos;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- melhoria do meio ambiente, através da diminuição da poluição sonora, visual e do ar causada pela exploração das jazidas naturais e pelo acúmulo de resíduos de obras;
- economia nos custos das obras de pavimentação, visto que os agregados reciclados apresentam valor inferior quando comparados aos agregados naturais;
- elevado consumo de material reciclado, tanto na fração graúda quanto miúda;
- a utilização de parte da fração graúda diminui o consumo de energia necessária durante o processo de reciclagem do RCD;
- simplicidade no processo de produção dos agregados e de execução das camadas de pavimento com estes agregados, contribuindo para a redução dos custos.

2.4.1. Classificação e requisitos para utilização dos agregados reciclados de acordo com as normas brasileiras

2.4.1.1. Classificação de acordo com a resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA

De acordo com a resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA, agregado reciclado é o material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção que apresentem características técnicas para a aplicação em obras de edificação, de infraestrutura, em aterros sanitários ou outras obras de engenharia e reciclagem é o processo de reaproveitamento de um resíduo, após ter sido submetido à transformação.

No artigo terceiro da resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA, observa-se a classificação para os resíduos da construção civil, conforme segue:

I - Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;

b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;

c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;

II - Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras, gesso e outros;

III - Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação;

IV - Classe D - são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

Além disso, no artigo décimo são apontadas as destinações para os resíduos da construção civil, que devem ser das seguintes formas:

I - Classe A: deverão ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados, ou encaminhados a áreas de aterro de resíduos da construção civil, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura;

II - Classe B: deverão ser reutilizados, reciclados ou encaminhados a áreas de armazenamento temporário, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura;

III - Classe C: deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.

IV - Classe D: deverão ser armazenados, transportados, reutilizados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.4.1.2. Classificação de acordo com a norma ABNT NBR 15116:2004

De acordo com a norma ABNT NBR 15116:2004, os agregados reciclados são classificados como:

- ARC (agregados de resíduos de concreto): agregado reciclado obtido do beneficiamento de resíduo pertencente à classe A, composto na sua fração graúda de, no mínimo, 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas;
- ARM (agregados de resíduos mistos): agregado reciclado obtido do beneficiamento de resíduo pertencente à classe A, composto na sua fração graúda de menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas.

O ARC é considerado de maior qualidade por produzir argamassas e concretos com melhores características mecânicas. Além de apresentar maior densidade aparente.

O ARM é composto por resíduos cerâmicos e de argamassa e geralmente apresenta solo na sua fração fina. Os resíduos de origem cerâmica ou mista podem representar uma importante fração do volume total de RCD. Na maior parte das usinas de reciclagem do país, eles representam mais de 80% do RCD classe A. Quando devidamente reciclados, os resíduos cerâmicos são aplicados em aterros, como materiais de enchimento e como bases e sub-bases de pavimentos. Dependendo de sua composição química, podem ser finamente moídos e utilizados na correção de pH de solos. Em usos mais nobres, pode-se citar a fabricação de vasos ornamentais, tijolos maciços e argamassas não estruturais.

2.4.1.3. Requisitos previstos na norma ABNT NBR 15116:2004

A norma ABNT NBR 15116:2004 prevê requisitos para agregado reciclado destinado a pavimentação e ao preparo de concreto sem função estrutural e, para ambas utilizações se prevê apenas a utilização de material proveniente da classe A.

O agregado reciclado destinado à pavimentação deve atender os requisitos gerais, constantes na Tabela 2.16, e específicos, estes últimos referentes à classificação quanto ao tipo de emprego na execução de camadas de pavimentos, segundo parâmetros de capacidade de suporte expansibilidade, conforme Tabela 2.17, através da metodologia de ensaios previstas na norma ABNT NBR 9895:1987.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tabela 2.16 – Requisitos gerais para agregado reciclado destinado a pavimentação, conforme a norma ABNT NBR 15116:2004.

Propriedades		Agregado reciclado classe A		Normas de ensaios	
		Graúdo	Miúdo	Agregado graúdo	Agregado miúdo
Composição granulométrica		Não uniformidade e bem graduado com coeficiente de uniformidade $C_u > 10$		ABNT NBR 7181:1988	
Dimensão máxima característica		≤ 63 mm		ABNT NBR NM 248:2003	
Índice de Forma		≤ 3	-	ABNT NBR 7809:2008	-
Teor de material passante na peneira de 0,42 mm		Entre 10% e 40%		ABNT NBR 7181:1984	
Contaminantes – teores máximos em relação à massa do agregado reciclado (%)	Materiais não minerais de mesmas características (1)	2		Anexo A (2)	Anexo B (2)
	Materiais não minerais de características distintas (1)	3		Anexo A (2)	Anexo B (2)
	Sulfatos	2		ABNT NBR 9917:2009	

(1) Para os efeitos desta norma, são exemplos de materiais não minerais: madeira, plástico, betume, materiais carbonizados, vidros e vidrados cerâmicos.

(2) Anexo A e Anexo B da ABNT NBR 15116:2004

Tabela 2.17 – Requisitos específicos para agregado reciclado destinado a pavimentação, conforme a norma ABNT NBR 15116:2004.

Aplicação	ISC (CBR) %	Expansibilidade %	Energia de compactação
Material para execução de reforço de subleito	≥ 12	$\leq 1,0$	Normal
Material para execução de revestimento primário e sub-base	≥ 20	$\leq 1,0$	Intermediária
Material para execução de base de pavimento	≥ 60	$\leq 0,5$	Intermediária ou modificada

(1) Permitido o uso como material de base somente para vias de tráfego com $N \leq 10^6$ repetições do eixo padrão de 8,2 tf (80 kN) no período de projeto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Já o agregado reciclado destinado à utilização em concreto não estrutural, substituindo parcial ou totalmente os agregados convencionais, deve atender os requisitos constantes na Tabela 2.18.

Tabela 2.18 – Requisitos para agregado reciclado destinado ao preparo de concreto sem função estrutural, conforme a norma ABNT NBR 15116:2004.

Propriedades		Agregado reciclado classe A				Normas de ensaios	
		ARC		ARM		Agregado graúdo	Agregado miúdo
		Graúdo	Miúdo	Graúdo	Miúdo		
Teor de fragmentos à base de cimento e rochas (%)		≥ 90	-	< 90	-	Anexo A (2)	-
Absorção de água (%)		≤ 7	≤ 12	≤ 12	≤ 17	ABNT NBR NM 53:2009	ABNT NBR NM 30:2001
Contaminantes – teores máximos em relação à massa do agregado reciclado (%)	Cloretos	1				ABNT NBR 9917:2009	
	Sulfatos	1				ABNT NBR 9917:2009	
	Materiais não minerais (1)	2				Anexo A (2)	Anexo B (2)
	Torrões de argila	2				ABNT NBR 7218:2010	
	Teor total máximo de contaminantes	3				-	
Teor de material passante na malha 0,75 µm (%)		≤ 10	≤ 15	≤ 10	≤ 20	ABNT NBR NM 46:2003	

(1) Para os efeitos desta norma, são exemplos de materiais não minerais: madeira, plástico, betume, materiais carbonizados, vidros e vidrados cerâmicos.

(2) Anexo A e Anexo B da ABNT NBR 15116:2004

2.4.2. Aplicação de agregado reciclado de resíduos de construção civil em bases e sub-bases de pavimentação – uma prática já consolidada no Brasil e no mundo

A produção de agregados reciclados de resíduos de construção para uso em bases e sub-bases de pavimentos ou para regularização de camadas primárias é uma das aplicações mais antigas deste material. No entanto, foi principalmente nos

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

últimos 30 anos, que inúmeras pesquisas foram desenvolvidas (POON, 1997; CARNEIRO *et al.*, 2001; CHINI *et al.*, 2001; NATAATMADJA; TAN, 2001; FERNANDES, 2004; MOTTA, 2005; ABDU; BERNUCCI, 2007; LEITE, 2007; MOREIRA *et al.*, 2007; SILVA *et al.*, 2008), demonstrando que, apesar da grande variabilidade, o uso dos agregados reciclados nestas camadas do pavimento é promissor. As experiências são satisfatórias e a prática é bastante difundida e consolidada em diversos países.

2.4.2.1. *Aplicação internacional*

Na Holanda, país que mais recicla RCD no mundo, cerca de 90% dos agregados reciclados produzidos é destinado à pavimentação. Desde a década de 70, os resíduos de alvenaria e de concreto são aproveitados como material para as camadas de base e sub-base de pavimentos (LEITE, 2007).

Molenaar e Van Niekerk (2002) *apud* Leite (2007) realizaram ensaios laboratoriais para verificar os efeitos da granulometria, composição e grau de compactação dos agregados reciclados nas propriedades mecânicas das camadas dos pavimentos. Concluíram que, apesar da graduação e da composição dos agregados reciclados serem fatores importantes, o mais influente deles é o grau de compactação. Este resultado é animador, pois parâmetros como composição e granulometria são mais difíceis de serem controlados. O grau de compactação pode ser facilmente fiscalizado e conferido a um baixo custo.

No Reino Unido, no início da década de 90, pesquisas analisaram resíduos de alvenaria e resíduos de concreto, para verificarem a viabilidade de aproveitamento dos mesmos em camadas de sub-base de pavimentos. Os resultados dos ensaios de índice de suporte Califórnia foram comparados aos da brita calcária. O agregado de concreto apresentou o mesmo comportamento do material calcário, com valores de ISC semelhantes. A brita cerâmica, em função da grande variabilidade de seus componentes, apresentou uma menor capacidade de suporte, porém, ainda assim, o seu índice de suporte Califórnia foi superior a 30% do limite mínimo estipulado pelo Reino Unido para que os materiais sejam empregados em camadas de sub-base (O'MAHONY; MILLIGAN, 1991 *apud* Leite, 2007).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na Austrália, Nataatmadja e Tan (2001) estudaram o comportamento resiliente de agregados reciclados de concreto obtidos de quatro amostras de concreto que foram divididas pelas diferentes resistências à compressão: 75 MPa, 49 MPa, 18,5 MPa e 15 MPa. Chegaram à conclusão que a resistência à compressão do concreto de origem interfere nos resultados de módulo de resiliência e na deformação permanente do agregado reciclado de concreto, porém para estes pesquisadores, o fator mais influente é a granulometria, pois eles verificaram que os materiais bem graduados resultam em módulos de resiliência mais elevados.

Nos Estados Unidos, em New Jersey, no final da década de 90, após um vasto estudo laboratorial com agregado reciclado de concreto, brita graduada e brita graduada acrescida de diferentes percentuais de agregado reciclado de concreto, os ensaios triaxiais de carga repetida, os resultados de módulo de resiliência e de deformação permanente indicaram que: tanto o agregado reciclado de concreto quanto a mistura de agregado reciclado de concreto com brita graduada simples possuem módulos de resiliência maiores que o da brita graduada simples. No entanto, o agregado reciclado de concreto apresentou maior deformação permanente quando comparado à brita graduada simples, nas mesmas condições (BENNERT *et al.*, 2000 *apud* LEITE, 2007).

No Florida Department of Transportation (FDOT – Departamento de Transportes do estado norte-americano da Flórida), entre 1996 e 1997, foram desenvolvidas pesquisas para a criação de metodologias e especificações para o aproveitamento de agregados reciclados de concreto provenientes dos antigos pavimentos de concreto, na composição do concreto de pavimentos rígidos e nas camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis (KUO *et al.*, 2001). A proposta do FDOT é reciclar o concreto retirado do pavimento a ser recuperado e aplicar o agregado reciclado de concreto para restaurá-lo ou reconstruí-lo. Reutilizar o concreto retirado no mesmo local. Desta forma, tem-se a otimização do processo de reciclagem e a diminuição nos gastos com o transporte e a deposição dos materiais (CHINI *et al.*, 2001).

Segundo o Federal Highway Administration (FHWA, 2012), por possuir drenabilidade, durabilidade e boa capacidade de suporte, o agregado reciclado de concreto é utilizado por, pelo menos, vinte estados norte-americanos, onde é

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

considerado um excelente material para emprego em camadas de base e sub-bases de pavimentos.

É consenso entre as pesquisas que os agregados reciclados de RCD para uso em pavimentação urbana e rural, em camadas de base, sub-base e reforço de subleito, são favoráveis do ponto de vista técnico, econômico e sócio-ambiental, apesar da durabilidade do agregado reciclado ao longo da vida útil do pavimento ainda ser questionada. Alguns estudos indicam que, em função da variabilidade na composição, alta porosidade, altas percentagens de absorção de água, características físicas e particularidades, os métodos de controle de qualidade usualmente empregados nos agregados naturais destinados à pavimentação não funcionam em agregados reciclados de construção civil (ZORDAN; JOHN, 2003). Daí a importância de se respeitar as normas e especificações já existentes para este material, cumprindo as determinações e limites estabelecidos (BLANKENAGEL; GUTHRIE, 2006 *apud* LEITE, 2007).

2.4.2.2. Aplicação nacional

Atualmente, várias cidades possuem obras de pavimentação executadas com brita corrida reciclada nas camadas de base e sub-base, como exemplo São Paulo, Curitiba, Mauá, São Bernardo do Campo, Vinhedo, João Pessoa e Belo Horizonte (MARINHO, 2011).

Moreira *et al.* (2007) afirmam que soluções para o uso dos resíduos sólidos de construção reciclados vêm sendo pesquisadas e desenvolvidas em vários centros urbanos como em Belo Horizonte onde, por exemplo, a Prefeitura conseguiu desenvolver metodologias para emprego de reciclados como base de pavimentos e a técnica é empregada com sucesso comprovado pelas obras efetuadas e acompanhadas. Em 2003 foi executada uma pista experimental com o uso do agregado reciclado na camada de base, num local bastante solicitado, que serve de acesso a um aterro sanitário e passados três anos de uso, visualmente não foi percebido nenhum tipo de defeito no pavimento sendo que o acompanhamento do trecho feito até fevereiro de 2006. Após tal feito, a Secretaria de Obras do município passou a incluir em seus editais de licitação a opção de utilização de materiais reciclados de resíduos de construção e demolição em camadas de base de

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

pavimento de vias locais. Os autores afirmaram que em setembro de 2005, a Prefeitura de Uberlândia-MG, através da Secretaria de Obras e já com base em especificações técnicas constantes do edital de licitação, proporcionou a alternativa de utilização de resíduo sólido reciclado britado na execução da base de 880 metros de pavimento.

Em Belo Horizonte já existem vias urbanas executadas (dimensionadas empiricamente) com esse material aplicado em base e sub-bases de pavimentos, com sucesso, aproveitando os agregados reciclados produzidos pelas três usinas de reciclagem da prefeitura (FERNANDES, 2004). A autora complementa que tais agregados apresentam desempenho satisfatório e semelhante aos trechos executados apenas com agregado natural. Desde 1996 até julho de 2001, aproximadamente 400 km de ruas foram implantadas e reconstruídas, resultando no aproveitamento de 136.840 toneladas de resíduos de construção (DIAS, 2004).

Fernandes (2004) estudou a caracterização mecânica de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição dos municípios do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte para uso em pavimentação e após analisar os resultados dos ensaios de módulo de resiliência, verificou que a granulometria e a energia de compactação pouco interferem no módulo de resiliência, que sofre mais influência da composição do agregado reciclado. Os agregados reciclados mistos possuem valor de módulo de resiliência menor que os agregados reciclados de concreto e estes, possuem o módulo menor que o encontrado para a brita graduada natural. Os ensaios triaxiais com cargas repetidas, que indicam a deformação permanente dos agregados, demonstraram que a granulometria e a energia de compactação interferem na deformação permanente do material. Quando comparado à brita graduada natural, para o mesmo nível de tensões, o agregado reciclado foi mais resistente, apresentando menor deformação permanente. Fernandes (2004) concluiu que os resultados obtidos através de sua tese corroboram para a comprovação das viabilidades técnica, econômica, social e ecológica do emprego destes materiais em pavimentação, já que tal uso é viável tecnicamente, economicamente motivador, ambientalmente benéfico e, além disso, uma resposta à necessidade de crescimento sustentável não apenas de um município, mas de um país, caracterizando a adoção da “filosofia” da racionalidade, da filosofia da preservação. Salienta-se que o autor

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

estudou tal aplicação em bases, sub-bases e reforços de subleito de pavimentos urbanos e rurais.

Marinho (2011) explica que a área de circulação do Campus Zona Leste da USP foi pavimentada com agregado reciclado e asfalto-borracha, exigência contida no edital de licitação da obra. O agregado reciclado utilizado foi controlado tecnologicamente com base nos requisitos contidos na norma ABNT NBR 15116:2004. Os resultados financeiros desta obra foram satisfatórios, apresentaram uma economia de aproximadamente 40% e, adicionalmente, a autora complementa que existem também obras privadas que utilizaram agregados reciclados na pavimentação, como por exemplo: o supermercado Carrefour e o pátio da fábrica da Yoki, ambas na região de São Bernardo do Campo/São Paulo.

Em Florianópolis, Santa Catarina, Trichês e Kryckyj (1999) *apud* Marinho (2011) estudaram quatro tipos de materiais diferentes para analisar as características físicas e verificar a capacidade de suporte dos mesmos, sendo eles resíduo branco, formado principalmente por restos de argamassas e concreto, resíduo vermelho, formado por resíduos cerâmicos, telhas, tijolos, solo areno-siltoso e solo argiloso. Após avaliarem os resíduos, os solos e as misturas de solo com diferentes percentuais de resíduo, concluíram que: os RCD não apresentaram expansão, além de colaborarem para a diminuição da expansão nas misturas com solo; as misturas solo-resíduo apresentaram índice de suporte Califórnia mais elevado que os resíduos; acrescentando-se resíduos à parcela fina dos solos, percebeu-se uma melhora na compactação e consequente aumento da capacidade de suporte.

Carneiro *et al.* (2001) realizaram ensaios de caracterização física e mecânica (análise granulométrica, abrasão Los Angeles, compactação e índice de suporte Califórnia) nos agregados reciclados, a fim de verificar a viabilidade técnica para o emprego do material em camadas de base e sub-base de pavimentos, na Bahia. Os resultados com as frações graúda e miúda dos agregados e com diferentes proporções de agregados misturados ao solo foram satisfatórios, confirmando a viabilidade de uso do material.

Em 2002, em Goiânia, Ribeiro *et al.* (2002) *apud* Marinho (2011), analisaram o comportamento de agregados reciclados brancos, vermelhos e misturas dos agregados reciclados com o solo, para aproveitamento em pavimentação. Após a

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

realização dos ensaios de compactação e índice de suporte Califórnia, eles concluíram a viabilidade técnica do uso do material.

Também em Goiânia, entre 2003 e 2004, numa pesquisa desenvolvida por FURNAS em parceria com a Prefeitura Municipal de Goiânia, foi executada uma pista experimental, num local de intensa movimentação de caminhões, por ser acesso à central de abastecimento da cidade. Foram utilizadas misturas de solo argiloso com agregado reciclado na proporção de 75% de agregado reciclado para a camada de base e 83% de agregado reciclado para a camada de sub-base. Após analisarem os resultados dos ensaios realizados na pista experimental, Mendes *et al.* (2004) *apud* Marinho (2011) concluíram que o agregado reciclado é satisfatório para ser aplicado em camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis, demonstrando a viabilidade técnica.

Bodi *et al.* (1995), citados por Fernandes (2004), realizaram um dos primeiros trabalhos em pavimentação no Brasil utilizando esse tipo de agregado. Dentre outras coisas, eles verificaram o comportamento das misturas nas várias dosagens, observando que os grãos de RCD britado apresentam boa resistência à compressão e ao embricamento, quando comparados ao entulho bruto, uma vez que na britagem, a fragmentação se dá no plano de menor resistência do material, motivo pelo qual as frações menos resistentes são praticamente reduzidas às granulometrias de areias ou solos, resultando em material de enchimento e ancoragem dos grãos mais resistentes. Segundo eles, este fato é que resulta em uma curva de capacidade de suporte crescente, em função do aumento da porcentagem de RCD na mistura.

Em 2005, após conduzir ensaios de índice de suporte Califórnia, módulo de resiliência, resistência à tração e resistência à compressão simples, Motta (2005) concluiu que o agregado reciclado misto de RCD é uma boa alternativa para a execução de bases e sub-bases na pavimentação de vias nos grandes centros urbanos ou cidades de médio porte, caracterizadas pelo baixo volume de tráfego. O agregado reciclado misto aos 90 dias e 180 dias de cura, apresentou valores de índice de suporte Califórnia de 116% e 124%, respectivamente, superiores quando comparados à brita graduada simples, com ISC igual a 96%. O módulo de resiliência aos 90 dias de cura do agregado reciclado misto, entre 190 MPa e 400 MPa, foi semelhante ao da brita graduada simples, entre 200 MPa e 370 MPa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em São Paulo, Leite (2007) pesquisou o comportamento mecânico dos agregados reciclados mistos para aplicação em camadas de base e sub-base de pavimentos. A pesquisadora chegou à conclusão que, apesar da variabilidade do material, controlando-se a execução do pavimento e empregando-se energia de compactação modificada, o mesmo apresentará um bom desempenho. Segundo Leite, para que isto ocorra, é de fundamental importância o controle das propriedades físicas do agregado reciclado após a compactação, pois as quebras devem existir no decorrer da execução do pavimento e não durante a vida útil do mesmo.

Silva *et al.* (2008) estudaram RCD da região metropolitana de Fortaleza/Ceará, para fins de pavimentação. As misturas de solo continham 50% de RCD graúdo, 40% de RCD miúdo e 10% de solo da cidade de Fortaleza. Foram executados ensaios de caracterização dos materiais, índice de suporte Califórnia (ISC) e módulo de resiliência (MR). Foram empregadas três diferentes energias de compactação para verificar a influência da compactação no desempenho das propriedades mecânicas das misturas. Os resultados demonstraram a eficiência da estabilização da mistura de solo com RCD, comprovando a possível empregabilidade do material até mesmo para pavimentos com alto volume de tráfego.

2.5. Concreto betuminoso usinado a quente

No Brasil, dos 164.000 quilômetros de rodovias pavimentadas, 98% são revestidas com concreto asfáltico (BIANCHI *et al.*, 2008).

De acordo com o Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, o pavimento é uma superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentadas sobre um semi-espaço considerado teoricamente como infinito (infraestrutura ou terreno de fundação) a qual é designada de subleito (BRASIL, 2006).

O concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) é composto, segundo a especificação de serviço DNIT-ES 031:2006, por agregado graúdo, material retido na peneira nº4 (abertura de 4,8 mm), agregado miúdo, material passante na peneira nº4 e retido na peneira nº200 (abertura de 0,074 mm), filer mineral, também

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

chamado de material de enchimento (passante na peneira nº200), e cimento asfáltico de petróleo (CAP) - ligante utilizado para aglutinação dos agregados entre si, proporcionado coesão e impermeabilidade à mistura, além de contribuir para o conforto ao rolamento e segurança viária ao tráfego.

Marinho (2011) indica que vários são os fatores que interferem no comportamento e desempenho dos concretos betuminosos usinados a quente:

- projeto e prática construtiva adequados às condições locais;
- características dos agregados e do ligante;
- método de compactação;
- temperaturas e umidade: a temperatura máxima a qual o ligante suporta sem oxidar (ou até mesmo queimar) pode ser determinada pela curva da Viscosidade Saybolt-Furol. Além disto, os agregados e ligantes devem estar livres de umidade;
- carregamentos e estado de tensões;
- envelhecimento: para limitar o risco de envelhecimento precoce do ligante, ou até mesmo a queima do CBUQ, deve-se evitar a temperatura excessiva durante o processo de mistura (usinagem) e espalhamento no pavimento e, também, o alto teor de vazios, pois o contato com o ar acarreta a oxidação lenta;
- aditivos.

Os procedimentos de ensaio e de dosagem das misturas asfálticas vêm sofrendo algumas modificações que mostram uma forte tendência para deixar de lado os métodos antigos e projetá-las de acordo com as solicitações e especificações de cada projeto (tráfego, estrutura, condições climáticas, entre outras).

Para a dosagem do concreto betuminoso, os principais métodos de projeto são o método de dosagem Marshall, o método Hveem, o método Hubbard-Fiel, o método triaxial de Smith, e, desenvolvida mais recentemente, a metodologia Superpave.

No Brasil, os projetos de misturas asfálticas são executados quase que exclusivamente de acordo com a metodologia Marshall.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A metodologia Marshall foi desenvolvida nos Estados Unidos, na década de 30, por Bruce G. Marshall, do Departamento de Transportes do Estado do Mississippi, idealizada para determinar a quantidade de ligante (teor ótimo de ligante) a ser utilizada na composição de misturas betuminosas destinadas à pavimentação, baseia-se nos valores de densidade e volume de vazios, estabilidade e fluência.

Para o projeto de um concreto asfáltico pelo Método Marshall, deve-se definir os seguintes elementos básicos (CERATTI; REIS, 2011):

- tipo e destino da mistura a ser projetada;
- granulometria, massa específica real e aparente dos agregados disponíveis;
- escolha da faixa granulométrica de projeto;
- em função do tráfego previsto, escolher a energia de compactação para a moldagem dos corpos de prova.

Marinho (2011) cita que durante a segunda guerra mundial, o crescente aumento de cargas e das pressões dos pneus dos aviões militares (pesados aviões de bombardeio), impulsionou o Corpo de Engenheiros do Exército Americano a comparar, dentre os métodos de dosagem e controle de qualidade das misturas asfálticas a quente disponíveis, o mais simples, prático e eficiente e, então, optou-se pelo método Marshall, pois aliado a tais características, possui portabilidade e fácil disponibilidade dos equipamentos necessários à realização dos ensaios requeridos, como consequência, o exército desenvolveu um vasto estudo sobre o método adotado, tornando-o conhecido e utilizado internacionalmente.

A metodologia Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements) foi desenvolvida por uma pesquisa denominada SHRP (Strategic Highway Research Program), pelo FHWA (Federal Highway Administration), entre os anos 1987 e 1993. Nesse programa, governo americano investiu US\$ 150 milhões, com a finalidade de testar e desenvolver novos métodos para especificação de ligantes asfálticos e dosagem das misturas, a fim de melhorar o desempenho, a durabilidade e a segurança das estradas.

Alguns estudiosos acreditam que o método de dosagem Superpave produz misturas mais semelhantes às condições de serviço, quando comparadas às

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

misturas obtidas pela dosagem Marshall. Com isto, pouco a pouco o método de dosagem Marshall vem sendo substituído pelo método Superpave. Porém, aqui no Brasil, a metodologia Marshall continua sendo a mais difundida e utilizada. Por este motivo, foi a escolhida para realização da presente pesquisa. A metodologia Superpave é utilizada no Brasil apenas em forma de teste, por alguns pesquisadores.

2.5.1. Normatização e requisitos para concretos betuminosos usinados a quente

Salienta-se que, embora esta pesquisa trate do estudo da utilização de agregado reciclado de concreto em concreto betuminoso usinado a quente, as normas apresentadas neste capítulo se referem à utilização de agregado natural em concreto betuminoso usinado a quente, previstas em normas, tanto nacionais como internacionais. Isso se deve ao fato de que não foram encontradas normativas referentes à utilização específica de agregado reciclado de concreto em concretos asfálticos. Aqui, portanto, se verifica uma lacuna a ser preenchida, considerando os bons resultados para utilização desse material obtidos até o momento, que indicam viabilidade favorável.

No Brasil, o projeto de dosagem das misturas asfálticas a quente para pavimentação é realizado de acordo com a especificação de serviço DNIT-ES 031:2006, devendo ser executado com rigorosa seleção e controle dos materiais e processos, desde a coleta, armazenagem, produção da mistura, ensaios de caracterização e aplicação no pavimento. A Especificação de Serviço nº 031, de 2006, indica limites para propriedades para agregados miúdos e graúdos, conforme indicado na Tabela 2.19, e faixas granulométricas, apresentadas na Tabela 2.20, para fins de aplicação em pavimentos flexíveis do tipo concreto asfáltico.

A Especificação de Serviço nº 031 ainda prevê que, caso o agregado graúdo a ser usado apresente um índice de desgaste Los Angeles superior a 50% poderá ser usado o método de ensaio DNER-ME 401:1999 – Agregados – determinação de degradação de rochas após compactação Marshall, com ligante IDml, e sem ligante IDm, cujos valores de tentativas de degradação para julgamento da qualidade de rochas destinada ao uso do concreto asfáltico usinado a quente são: $IDml \leq 5\%$ e

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

IDm > 8%. A Tabela 2.21 indica os valores limites ensaios nacionais para determinação da tenacidade e resistência à abrasão (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Tabela 2.19 – Normas nacionais para utilização de agregado em CBUQ (Adaptado pela autora de DNIT-ES 031:2006).

Ensaio	Norma	Limites (DNIT-ES 031:2006)
AGREGADO MIÚDO		
Agregados - determinação da abrasão “Los Angeles”	DNER-ME 035:1998	≤ 50%
Agregado - determinação do índice de forma	DNER-ME 086:1994	> 0,5
Durabilidade	DNER-ME 089:1994	< 12%
AGREGADO GRAÚDO		
Equivalente de areia	DNER-ME 054:1997	≥ 55%

Tabela 2.20 – Faixas granulométricas do concreto asfáltico (DNIT-ES 031:2006).

Peneira de malha quadrada		% em massa, passante			
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Tolerâncias
2”	50,8	100	-	-	-
1 1/2”	38,1	95 – 100	100	-	± 7%
1”	25,4	75 – 100	95 – 100	-	± 7%
3/4”	19,1	60 – 90	80 – 100	100	± 7%
1/2”	12,7	-	-	80 – 100	± 7%
3/8”	9,5	35 – 65	45 – 80	70 – 90	± 7%
Nº 4	4,8	25 – 50	28 – 60	44 – 72	± 5%
Nº 10	2,0	20 – 40	20 – 45	22 – 50	± 5%
Nº 40	0,42	10 – 30	10 – 32	8 – 26	± 5%
Nº 80	0,18	5 – 20	8 – 20	4 – 16	± 3%
Nº 200	0,075	1 – 8	3 – 8	2 – 10	± 2%
Asfalto solúvel no CS ₂₍₊₎ (%)		4,0 – 7,0 Camada de ligação (Binder)	4,5 – 7,5 Camada de ligação e rolamento	4,5 – 9,0 Camada de rolamento	± 0,3%

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tabela 2.21 – Ensaios nacionais para determinação da tenacidade e resistência à abrasão (BERNUCCI et al., 2006).

Métodos de Ensaio	Valores limites - Tentativa
DNER-ME 35:1998 – Agregado-determinação da abrasão Los Angeles	$LA \leq 65\%$
DNER-ME 399:1999 – Agregados-determinação de perda ao choque no aparelho de Treton	$T \leq 60\%$
DNER-ME 096:1998 – Agregado graúdo-avaliação da resistência mecânica pelo método dos 10% dos finos	$10\% \text{ finos} \geq 60 \text{ kN}$
DNER-ME 401:1999 – Agregado-determinação do índice de degradação de rochas após a compactação Marshall, com ligante – IDML e sem ligante IDM	IDML com ligante ≤ 5
	IDM sem ligante ≤ 8
DNER-ME 398:1999 – Agregados-determinação do índice de degradação após compactação Proctor-IDP	$IDP \leq 6$
DNER-ME 397:1999 – Agregado-determinação do índice de degradação Washington- IDW	$IDW \leq 30$
DNER-ME 197:1997 ou ABNT NBR 9938:2013 Agregados - determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos	$E \geq 60$

A Tabela 2.22, adaptada de Wen e Bhusal (2011), indica os limites previstos em normas internacionais para o uso de agregado em pavimentação.

Tabela 2.22 – Normas internacionais para utilização de agregado em CBUQ (Adaptado pela autora de WEN; BHUSAL, 2011).

Propriedade	Norma	Limite
Abrasão Los Angeles	AASHTO 96	$< 30\%$
Sanidade	WSDOT 113	$< 30\%$
Lamelaridade agregado graúdo	WSDOT / ASTM D4791	$< 10\%$

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Continuação da Tabela 2.22 – Normas internacionais para utilização de agregado em CBUQ (Adaptado pela autora de WEN; BHUSAL, 2011).

Propriedade	Norma	Limite
Equivalente de areia	WSDOT / ASTHO T176	> 45%
Angularidade	AASHTO T304 and ASTM C1252	> 40%
Massa específica agregado gráudo	AASHTO T85	não específica
Massa específica agregado miúdo	AASHTO T84	não específica

2.5.2. Aplicação de agregado reciclado de resíduos de construção civil em concretos betuminosos usinados a quente

Apesar do uso de agregado reciclado de resíduos de construção civil em bases e sub-bases de pavimentação já se concretizar uma prática consolidada, conforme verificado nesta revisão bibliográfica, os estudos na área da aplicação de tal agregado no revestimento de CBUQ são muitos recentes e escassos e ainda não se verificou um trecho experimental com tal elemento no Brasil.

A busca pelo desenvolvimento sustentável na pavimentação vem ganhando destaque devido a todas as razões já apresentadas. Na indústria de pavimentos asfálticos, um considerável número de inovações em materiais e tecnologias vem sendo explorados para averiguar e atender os requisitos de sustentabilidade. Cita-se como exemplo o reaproveitamento de pavimentos asfálticos removidos através de fresagem, a utilização de borracha triturada de pneus inservíveis (asfalto-borracha) e a escória de aciaria.

Ainda não existem normas que especifiquem os requisitos técnicos para que os agregados reciclados de concreto sejam aproveitados nas misturas de ARC em CBUQ, porém a criação de leis para utilização de materiais sustentáveis, inclusive em obras de pavimentação, vem ocorrendo no mundo e, inclusive no Brasil, conforme já mencionado.

O Federal Highway Administration (FHWA, 2012) publicou uma ampla revisão sobre a utilização de subprodutos na construção de rodovias, que contempla

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

de maneira generalista, a utilização de dezenove tipos de resíduos: pavimento asfáltico reciclado, cinza volante, cinza de termoeletrica, escória de aciaria, resíduo de incinerador, borrachas, tiras plásticas e fibras, vidro, entre outros.

Segundo o ALT-MAT (1999), citado por Marinho (2011) o emprego de agregados reciclados de concreto em pavimentos é recomendado não apenas em bases granulares ou estabilizadas, os mesmos devem ser utilizados também em pavimentos rígidos e ainda existem possíveis aplicações em misturas de concreto asfáltico a quente e em tratamentos superficiais.

A análise da viabilidade técnica e econômica do uso do agregado reciclado de concreto nas misturas asfálticas do tipo CBUQ está em fase inicial, sendo que apenas com a continuação e o aprofundamento das pesquisas será possível afirmar algo sobre o desempenho e a durabilidade do CBUQ com uso do agregado reciclado de concreto.

2.5.2.1. Experiência internacional

Paranavithana e Mohajerani (2006) estudaram na Austrália os efeitos dos agregados reciclados de concreto nas propriedades do concreto asfáltico. Os experimentos foram realizados à temperatura de 50°C, que é considerada a maior temperatura de serviço. Os autores demonstraram que para todos os parâmetros volumétricos analisados, exceto o volume de vazios, das amostras de concreto asfáltico compactado contendo ARC foram menores que nas amostras da mistura de controle, contendo somente agregado natural de basalto. A espessura do filme de ligante sobre os agregados das amostras de concreto asfáltico compactado contendo ARC foram menores que nas amostras da mistura de controle, fato que pode ter ocorrido devido à absorção do ARC, que, conforme verificado pelos autores, a absorção de água do ARC é superior à dos agregados naturais de basalto. O aumento no nível de compactação melhorou as propriedades mecânicas de módulo de resiliência e de capacidade de suporte e diminuiu a fluência. Os pesquisadores também compararam os resultados obtidos nos ensaios de densidade real, densidade aparente e absorção dos ARC, do agregado natural de basalto e da combinação do ARC com o agregado natural. Os pesquisadores consideram que os resultados obtidos são encorajadores.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Wong *et al.* (2007), em Singapura, investigaram a viabilidade da substituição do agregado granítico natural por 6% de agregado de concreto (< 0,075 mm) não tratado termicamente, 45% de agregado de concreto (< 3,15 mm) não tratado termicamente e 45% de agregado de concreto (< 3,15 mm) tratado termicamente em misturas asfálticas do CBUQ. As misturas foram projetadas pelo método Marshall com CAP classificado por penetração como 60/70 naquele país. Os autores realizaram ensaios para obter os parâmetros volumétricos e analisar os teores ótimos de ligante das três misturas, sendo que apenas os parâmetros volumétricos de duas misturas com substituição de ligantes que ficaram inferiores aos limites impostos pelo caderno de encargos, porém mesmo com esse fato, as três misturas estudadas se enquadraram nos critérios especificados pela Autoridade de Transportes Terrestres de Singapura. O processo de calcinação pelo qual os grãos de concreto tratados termicamente passaram serviu para converter o carbonato de cálcio (calcita) presente no concreto em cal livre (óxido de cálcio). O tratamento térmico (calcinação) no agregado de concreto, que resultou em descarbonatação, foi realizado em função da descoberta observada por autoridades rodoviárias de Singapura de que a inclusão de cal hidratada nas misturas asfálticas a quente acrescenta anos à vida útil da mistura (National Lime Association, 2004). Os efeitos químicos reduzem o potencial de desagregação e de envelhecimento pelo impacto do endurecimento oxidativo. O preenchimento pelo calcário melhora a resistência à deformação a altas temperaturas e aumenta a resistência ao trincamento a baixas temperaturas. Essas alterações ajudam a criar pavimentos com melhores perspectivas de durabilidade. Os resultados de módulo de resiliência e resistência à fluência obtidos para as misturas com substituição por ARC e para a mistura referência foram próximos, porém as misturas com maior percentual de ARC apresentaram maior módulo de resiliência e resistência à fluência. Os resultados promissores, quanto à caracterização mecânica, encontrados pelos pesquisadores demonstram que é viável a substituição parcial do agregado natural pelo reciclado de concreto em misturas asfálticas a quente, dosadas pelo método Marshall.

Pérez *et al.* (2011), avaliaram, na Espanha, a possibilidade de projetar CBUQ para pavimentos rodoviários com agregados graúdos reciclados de construção. As percentagens de agregados reciclados utilizados nas misturas foram: 20%, 40% e 60%. Cimento e cal foram utilizados como fíler. As misturas realizadas

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

com agregados graúdos reciclados respeitaram as especificações Marshall para estradas de baixo volume de tráfego. As misturas também mostraram boa resistência às deformações permanentes. No entanto, os pesquisadores suspeitam que o CBUQ com agregados reciclados pode ter durabilidade insuficiente, devido a sua alta sensibilidade à ação da água.

Mills-Beal e You (2010), do Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan Technological University, Estados Unidos, pesquisaram, em 2010, as propriedades mecânicas de misturas asfálticas a quente com agregados reciclados de concreto para rodovias de baixo volume de tráfego, baseando-se na hipótese de que o agregado reciclado de concreto apresentaria melhor desempenho quando em pavimentos menos solicitados. Nesse estudo, o agregado natural foi substituído pelo agregado reciclado de concreto em proporções que variaram de 25%, 35%, 50% e 75%. Os resultados demonstraram que quanto maior a quantidade de ARC nas misturas, maiores os danos por umidade, possivelmente devido à maior absorção dos ARC em comparação aos agregados naturais. O ensaio de energia de compactação mostrou que a utilização do ARC no CBUQ diminuiu a energia necessária para a compactação dos corpos de prova, em comparação com a mistura referência. Os autores também verificaram que quanto maior o teor de substituição de agregado natural por ARC menores eram os resultados obtidos dos parâmetros volumétricos de VAM e RBV, possivelmente devido à maior absorção dos ARC em comparação aos agregados naturais. Os resultados dos testes dinâmicos mostraram que a rigidez das misturas com ARC foram menores do que da mistura de controle. Os pesquisadores concluíram que o ARC é capaz de substituir satisfatoriamente o agregado natural, em misturas asfálticas, para rodovias de baixo volume de tráfego. Os resultados dos ensaios demonstraram que as deformações permanentes não serão problema nas misturas com até 75% de agregado reciclado de concreto, não sendo aconselhável, porém, a substituição do agregado virgem pelo ARC acima do percentual de 75%.

Na China, Zhu *et al.* (2011) estudaram o uso de agregados reciclados em concreto asfáltico, sendo a origem dos agregados de estruturas danificadas por terremotos demolidas. O agregado reciclado utilizado nesta pesquisa continha cerca de 71,20% de resíduos de concreto (ARC), seguido por 26,16% de resíduos do tijolo e 2,30% de resíduos de cerâmica, estando classificado, portanto, de acordo com a

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

norma ABNT NBR 15116:2004 como agregado reciclado misto, pois contém menos de 10% de fragmentos à base de cimento Portland e rochas. Devido à absorção elevada de agregados reciclados, foi utilizada uma resina de silicone líquido para pré-tratamento do agregado reciclado. Após pré-tratamento dos agregados reciclados, o valor abrasão Los Angeles, massa específica aparente, absorção de água e adesão com asfalto foram testados de acordo com as normas chinesas JTGE42:2005 e 052:2000. Os resultados experimentais indicaram que o pré-tratamento do agregado reciclado com resina de silicone melhorou a resistência, a absorção, a adesão com asfalto e a morfologia da superfície do agregado reciclado, devido à grande penetração, a hidrofobicidade e aderência. A introdução de agregado reciclado teve um impacto negativo efeito sobre a resistência à umidade e na flexibilidade em baixa temperatura, sendo que o tratamento dos agregados apresentou melhora dessas propriedades, porém, teve efeito negativo sobre a deformação permanente da mistura de asfalto a alta temperatura. Finalmente concluem que a utilização de resíduos em mistura asfáltica é tecnicamente viável com a substituição de agregado natural por agregado reciclado e do pré-tratamento de agregado reciclado graúdo com resina líquida de silicone.

Também na China, uma pesquisa realizada por Chen *et al.* (2011), avaliou o potencial de uso do pó resultante da reciclagem de resíduos de concreto como fíler, substituindo totalmente o pó calcário convencional, para concreto betuminoso usinado a quente. Foram avaliadas as propriedades do pó de concreto reciclado através dos ensaios de difração de raios X, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de raios X. As misturas asfálticas com adição do pó reciclado foram avaliadas através de testes de resistência à tração, módulo de resiliência, creep dinâmico e fadiga, comparando-se os resultados com uma mistura de referência dosada com pó calcário. Os resultados indicaram que o pó dos agregados de concreto pode melhorar as propriedades das misturas asfálticas, inclusive a sensibilidade à água e a resistência à fadiga. No entanto, pode ocorrer uma diminuição no desempenho a baixas temperaturas. Todos os resultados indicaram que o pó do agregado reciclado de concreto pode ser utilizado em pavimentação asfáltica, especialmente em regiões de clima quente.

Arabani e Azarhoosh (2012), pesquisadores do Department of Civil Engineering, da University of Guilan, do Irã, estudaram propriedades mecânicas de

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

misturas asfálticas com agregados reciclados de concreto e agregados de escória de aciaria. Seis misturas de asfaltos contendo três tipos de agregados (agregado natural ígneo, agregado reciclado de concreto e agregado de escória de aciaria) foram utilizados na dosagem Marshall para determinar o teor ótimo de ligante asfáltico. As características mecânicas das misturas foram avaliadas quanto aos parâmetros volumétricos e de estabilidade da dosagem Marshall, módulo de resiliência, ensaio de creep dinâmico, deformação permanente e vida de fadiga. De acordo com os autores, a melhor mistura era a que continha agregados graúdos reciclados de escória de aciaria e agregados miúdos reciclados de concreto, devido aos resultados do teor ótimo de ligante, da vida de fadiga, da deformação permanente, que foi 40% menor que a deformação permanente da mistura referência, e do módulo de resiliência, 2,35 vezes melhor que a mistura de referência. As propriedades mecânicas obtidas para a mistura contendo apenas ARC como agregado não foram satisfatórias. As seis misturas asfálticas (referência, FA: RCA, CA: RCA, FA: SS, CA: SS e FA: RCA + CA: SS) apresentaram teores ótimos de ligante de 5,1%, 5,6%, 6,5%, 5,3%, 5,5% e 5,9%, respectivamente.

2.5.2.2. Experiência nacional

Na cidade de Recife-PE, Marinho (2011) analisou o desempenho mecânico de concretos betuminosos usinados a quente com o uso de agregado graúdo reciclado de concreto. Este trabalho buscou avaliar o comportamento mecânico da mistura do tipo CBUQ com ARC, através dos ensaios de resistência à tração estática por compressão diametral, módulo de resiliência por compressão diametral e vida de fadiga a tensões controladas. As misturas foram dosadas pelo método Marshall, utilizando-se agregados reciclados e lavados de concreto na forma de brita 25mm e pedrisco 9,5 mm, substituindo-se o agregado graúdo natural na composição das misturas por agregado reciclado em proporções que variaram entre 0% (mistura de referência), 25%, 50%, 75% e 100%, respeitando-se a composição granulométrica da faixa B do DNIT, com CAP 50/70. Todas as misturas apresentaram resultados de estabilidade, fluência, MR e RT satisfatórios, sendo que os resultados obtidos, inclusive, foram bem semelhantes aos da mistura de referência (com 100% de agregado natural). De modo geral, a autora observou a correlação existente entre as propriedades volumétricas e mecânicas do CBUQ e a absorção de água dos

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

agregados que compõem os traços das cinco misturas estudadas. Os resultados obtidos nos ensaios de fadiga apresentaram grande dispersão, fato que dificultou o entendimento, não sendo possível qualquer tipo de conclusão quanto à durabilidade das misturas estudadas. Concluiu que apesar de tais agregados possuírem elevada absorção, eles apresentaram características satisfatórias e se enquadram nas especificações do DNIT para emprego em concretos asfálticos. Além disso, os ensaios volumétricos e mecânicos realizados na mistura de referência e nas misturas com estes reciclados apresentaram semelhança entre os resultados, sem aumento do consumo de ligante, motivo pelo qual os resultados indicam uma possível viabilidade técnica para execução de concretos asfálticos com o aproveitamento destes resíduos.

No município de Manaus, capital do Amazonas, Frota *et al.* (2004) *apud* Marinho (2011) fizeram ensaios comparativos do desempenho de diferentes tipos de agregados de pedreiras regionais na produção de CBUQ. Os autores avaliaram a fluência de misturas asfálticas com agregados reciclados e CAP 50-60. Foram analisadas 3 misturas de CBUQ com teor de ligante de 8%, classificadas em três grupos segundo a graduação da zona de restrição Superpave: A (passando acima da zona de restrição), B (passando abaixo da zona de restrição) e C (entre a referida zona). Dentro de cada grupo, as amostras foram diferenciadas segundo o envelhecimento controlado em estufa não ventilada (600°C, 0h, 8h, 24h) e submetidas ao ensaio de fluência. Como resultados, os pesquisadores afirmam que as misturas envelhecidas apresentaram uma rigidez maior por conta da perda de material volátil do ligante e, além disso, o Grupo C, que passa ao longo da zona de restrição, possui finos distribuídos de maneira mais irregular ao longo dos vazios existentes entre os agregados graúdos o que contribui para que a interação seja menos eficiente no momento em que ocorre a solicitação por parte do pavimento. As misturas dos Grupos A e B demonstraram resultados mais satisfatórios por conta de um melhor envolvimento dos finos ao longo dos vazios. Os resultados demonstraram que as misturas com argila calcinada e com agregado reciclado apresentaram maiores estabilidades que a mistura com seixo (agregado comum na região).

Guimarães e Ribeiro (2005), no município de Goiânia, estado de Goiás, em parceria com FURNAS Centrais Elétricas S.A. analisaram misturas asfálticas do tipo CBUQ, dosadas pelo método Marshall na faixa C do DNIT, com CAP 20 e com

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

agregados mistos (compostos de resíduos de concreto, de argamassa e cerâmicos) e agregados de concreto compactado a rolo (CCR). A mistura de referência foi realizada com micaxisto (agregado natural da região). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Asfalto do Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas.

Em Fortaleza, Ceará, Ron *et al.* (2008) avaliaram as características do concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) produzido com agregados reciclados graúdos e miúdos tipo ARC (agregado de resíduos de concreto) obtidos na usina de reciclagem USIFORT, CAP 50-70 da LUBNOR (Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste) e carbonato de cálcio da Carbomil como fíler para preenchimento dos vazios da mistura. O procedimento de dosagem seguiu a metodologia Marshall e a faixa granulométrica C do DNIT. Antes da realização das misturas asfálticas, o resíduo passou por um processo de seleção, onde foram descartados materiais cerâmicos, gesso, vidro e ferragens.

Em Belo Horizonte, Silva (2009) estudou o agregado reciclado de concreto para uso em misturas asfálticas destinadas a vias urbanas com baixo volume de tráfego. O agregado reciclado era proveniente da Usina de Reciclagem da SLU/BR. As misturas foram dosadas pelo método Marshall, se enquadrando nas faixas B e C do DNIT, com a utilização de ligantes CAP 30/45 e CAP 50/70 e material de enchimento (fíler) cal cálcica hidratada. Foram analisados, através de ensaios laboratoriais, o módulo de resiliência, a resistência à tração e a deformação permanente. O pesquisador observou que, nas misturas dosadas na faixa C, com o ligante mais consistente, CAP 30/45, as características mecânicas foram melhoradas, comparando-se com a mesma mistura realizada com o CAP 50/70. As relações entre vazios preenchidos por betume e os vazios totais ficaram dentro dos parâmetros usuais. Os resultados obtidos nos ensaios foram considerados satisfatórios.

2.6. Propriedades dos agregados reciclados

A quantidade de agregado mineral em misturas asfálticas de pavimentação é geralmente de 90 a 95% em peso e 70 a 85% em volume, esta parcela mineral é parcialmente responsável pela capacidade de suporte de cargas dos revestimentos (CARNIN, 2008).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Marinho (2011), explica que por ser avaliado como material nobre para a engenharia, em função de importantes qualidades para obras de pavimentação como: potencial de auto-cimentação (decorrente da presença de materiais pozolânicos), boa resistência mecânica e baixa expansibilidade, parte do agregado reciclado de construção civil produzido no Brasil e no exterior vem sendo utilizada quase que exclusivamente em base, sub-base e reforço de pavimentos.

Para utilizar o agregado reciclado de concreto deve ser verificada a qualidade, a qual não é assegurada apenas pela produção de um material limpo, britado e bem classificado granulometricamente. O material produzido deve ser adequado para seu uso específico e respeitar os limites de classificação determinados para aquele fim e cumprir ainda outras exigências como estabilidade e durabilidade.

De acordo com Zhu *et al.* (2011), as diferenças das propriedades do agregado fino são muito pequenas, exceto para absorção de água, porém para as diferenças das propriedades dos agregados graúdos reciclados para os agregados graúdos naturais são mais expressivas.

2.6.1. Granulometria

Segundo Roberts *et al.* (1996) *apud* Bernucci *et al.* (2006) uma das propriedades físicas dos agregados que determinam principalmente a adequação para o uso em misturas asfáltica é o tamanho e graduação dos grãos, sendo que a espessura mínima de execução de uma camada de concreto asfáltico determina o tamanho máximo do agregado usado nesta mistura.

Para Pinto (1999), a granulometria do agregado, normalmente representada pela curva de distribuição granulométrica, é uma das características que asseguram maior estabilidade aos pavimentos, quanto maior o atrito interno obtido por entrosamento das partículas, desde a mais graúda à partícula mais fina.

No que se refere a agregados reciclados, Sagoe-Crentsil e Brown (1998) *apud* Buttler (2003) citam que a granulometria do agregado depende do processo de britagem utilizado, conforme já mencionado nessa revisão bibliográfica.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Sabe-se que granulometria contínua é aquela em que estão presentes todos os tamanhos de partículas de um determinado intervalo granulométrico, permitindo que os grãos menores do material se encaixem nos vazios intergranulares dos maiores, possibilitando constituir um material mais compacto, com melhor intertravamento e atrito interno, e, conseqüentemente mais resistente e menos deformável.

Bodi *et al.* (1995) *apud* Fernandes (2004) realizaram um dos primeiros trabalhos em pavimentação no Brasil utilizando de agregado reciclado do município de São Paulo, estado de São Paulo. Dentre outras coisas, eles verificaram o comportamento das misturas nas várias dosagens, observando que os grãos de RCD britados apresentaram melhor resistência à compressão e ao embricamento, quando comparados ao entulho bruto, uma vez que na britagem, a fragmentação se dá no plano de menor resistência do material. Portanto, as frações menos resistentes são praticamente reduzidas às granulometrias de areias ou solos, resultando em material de enchimento e ancoragem dos grãos mais resistentes.

2.6.2. Desgaste por abrasão Los Angeles

Define-se, através do método de ensaio DNER-ME 035:1998, o desgaste por abrasão Los Angeles do agregado, quando colocado na máquina Los Angeles, juntamente com uma carga abrasiva, esferas padrões de aço, submetido a um determinado número de revoluções desta máquina, à velocidade de 30 rpm a 33 rpm, sendo o resultado do ensaio avaliado, em percentual, pela perda de material em relação massa inicial da amostra passante na peneira nº 12, com abertura de 1,7mm.

Pinto (1999) ressalta que o valor Los Angeles deve ser baixo para os serviços do tipo tratamento superficial e macadame betuminoso, sendo que nas misturas betuminosas geralmente é possível projetar uma matriz argamassada de modo a atenuar a má qualidade do agregado, assim, por exemplo, uma argamassa com excesso de agregado miúdo, fíler e cimento asfáltico, minimiza o atrito dos grãos, sem alterar as demais características da mistura betuminosa.

Um trabalho interessante foi desenvolvido por Buttler (2003), onde se compara a perda de material por abrasão em uma amostra de agregado natural, que

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

foi aproximadamente igual a 20%, com a perda de material dos agregados reciclados a partir de concretos produzidos com este agregado de várias idades (1, 7, 28 dias), a qual girou em torno de 42% (1 dia) e 29% (28 dias).

Para fins de comparação entre os agregados reciclados e naturais, o estudo realizado por Ribeiro (2006) verificou que, em 1996, o Rio de Janeiro produzia 9 milhões de toneladas de agregados, produzidos por 32 pedreiras de pequeno e médio porte. Segundo o Sindibrita, a região metropolitana respondia por cerca de 80% da demanda total do estado. Foram coletadas amostras de rochas e de agregados em graduações de brita 1 e 2 de 24 pedreiras situadas na cidade do Rio de Janeiro e região metropolitana. Os autores realizaram ensaio de abrasão Los Angeles para as britas selecionadas e relacionaram:

1. Uma classificação por faixas de avaliação: excelente para desgastes de até 20%, bom para valores de 20% a 30%, regular, para desgastes de 30% a 40%, e insatisfatória para desgastes superiores a 40%;

2. A norma ASTM C33:1972, que fixa a perda máxima no ensaio de abrasão em 50%, porém, aconselha que nos agregados para concreto hidráulico exposto ao desgaste, o desgaste máximo seja de 30%;

3. A especificação de serviço DNIT-ES 031:2006 (de maior interesse para essa dissertação) que, para uso em revestimento, especifica para o agregado um desgaste de no máximo 50%;

4. As especificações do LNEC, que preveem, para concretos betuminosos um desgaste menor ou igual a 35% (E-265:1973), e, para revestimentos superficiais, menor ou igual a 40% (E-266:1973);

5. As recomendações francesas, bastante rigorosas na especificação de tratamentos superficiais, caso em que prescrevem um desgaste inferior a 25%;

6. A especificação brasileira EB 655, para lastro ferroviário, que fixa o desgaste máximo em 40%;

7. A norma brasileira ABNT NBR 7211:2005, estabelece que a abrasão deve ser inferior a 50% em peso do material.

Verificaram, então, de acordo com a norma brasileira ABNT NBR 7211:2005:

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1. Em 4 das 24 pedreiras analisadas (16,7% dos casos), as duas graduações de brita produzidas apresentaram resultados insatisfatórios;

2. Em 12 das 24 pedreiras (50% dos casos), pelo menos uma das duas graduações apresentou resultado insatisfatório.

No trabalho de Zhu *et al.* (2011), que, conforme já mencionado foi utilizado agregado misto para confecção das misturas analisadas, o valor de abrasão Los Angeles encontrado para o agregado reciclado gráúdo apresentou valores mais elevados do que para o agregado gráúdo natural, o que demonstra menor resistência à abrasão dos agregados reciclados gráúdos, se comparados com os naturais. Os autores verificaram que a propriedade testada não se enquadrou nas exigências da especificação da China para agregados naturais, portanto para que todas as propriedades do agregado reciclado atendessem os requisitos da especificação da China para o agregado natural, os agregados foram pré-tratados, utilizando uma resina de silicone líquido para pré-tratamento do agregado reciclado.

Paranavithana e Mohajerani (2006) verificaram que o potencial de degradação do ARC é significativamente maior que no agregado de basalto.

Guimarães e Ribeiro (2005) constataram que o desgaste por abrasão Los Angeles do ARM é superior ao desgaste do ARC, sendo que para o ARM, os valores obtidos ficaram acima do especificado no método de ensaio DNER-ME 035:1998, e, para o ARC, apesar de apresentar maior desgaste que a brita natural, se enquadrou dentro do limite estabelecido pela norma.

Ron *et al.* (2008) foi o único pesquisador verificado nessa revisão bibliográfica que observou melhores resultados de abrasão Los Angeles para o agregado reciclado em comparação à brita convencional.

2.6.3. Forma dos grãos

Segundo a norma ABNT NBR 7809:2008, que descreve o método através do qual se determina o índice de forma do agregado gráúdo com dimensão máxima característica superior a 9,5 mm, o índice de forma dos grãos é média da relação entre o comprimento e a espessura do agregado, ponderada pela quantidade de grãos de cada fração granulométrica que o compõe.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Lima (1999) afirma que, dependendo do tipo do resíduo de construção e demolição, bem como dos equipamentos utilizados durante o processo de britagem, o agregado reciclado pode apresentar forma mais lamelar e textura mais áspera que os agregados convencionais.

Levy (2001) observou que a forma dos grãos tem influência no volume total de pasta necessário para garantir a plasticidade especificada de determinado concreto, o autor continua afirmando que uma vez que os agregados miúdos reciclados contêm um grande número de partículas angulares, não constitui surpresa o fato de que concretos elaborados exclusivamente com agregados reciclados, sejam mais consistentes e conseqüentemente apresentem menor trabalhabilidade do que concretos preparados com agregados naturais utilizando-se o mesmo traço.

Com base em pesquisas executadas por Hansen e Narud (1983) conclui-se que os agregados miúdos reciclados provenientes de processo de britagem, apresentam formas maiores e mais angulosas do que seria desejável para produção de boas misturas.

De acordo com estudo realizado por Ravindrarajah e Tam (1987), a forma das partículas dos agregados reciclados é mais angular que a dos agregados naturais.

Fernandes (2004) também afirma que, como produto final da reciclagem de resíduos provenientes de alvenaria serão gerados agregados mais angulosos e mais absorventes que os agregados provenientes de resíduos de concreto.

Pinto (1999) indica que nos revestimentos superficiais é importante trabalhar com agregados mais cúbicos ou menos lamelares, pois estes últimos são facilmente quebrados pela ação do tráfego, dando origem à formação acelerada de buracos na pista da rodovia.

Assim como no item anterior, cita-se o trabalho de Ribeiro (2006) com os agregados naturais ou convencionais (britas 1 e 2) do município do Rio de Janeiro e região metropolitana, em termos de índice de forma, os autores verificaram que os índices de forma de todos os agregados ensaiado corresponderam à forma cúbica. Os autores determinaram o índice de forma de acordo com a norma ABNT NBR 5564:2011.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Se, por um lado, encontram-se na área de pavimentação poucos trabalhos com agregados reciclados de entulho em que se contemple os estudos da forma dos mesmos, por outro, em se tratando de tecnologia do concreto isso é bem difundido e essencial à análise do comportamento e da confecção desse material. Nessa esfera, destaca-se mais uma vez Levy (2001), observando que a forma dos grãos tem influência no volume total de pasta necessário para garantir a plasticidade especificada de determinado concreto.

2.6.4. Absorção

Essa propriedade se apresenta como uma das propriedades com diferenças mais marcantes entre o agregado natural e o agregado reciclado (CARNEIRO *et al.*, 2001).

Absorção, Segundo Roberts *et al.* (1996) *apud* Bernucci *et al.* (2006), indica a quantidade de água que o agregado absorve quando imerso. Complementa que um agregado poroso irá absorver ligante asfáltico consumindo parte do ligante que dá a coesão à mistura e, para compensar este fato, se torna necessário incorporar quantidade adicional de ligante à mistura.

Vieira *et al.* (2004) confirma que os agregados reciclados possuem taxa de absorção de água mais elevada, se comparados com o agregado natural.

De acordo com Saeed *et al.* (2007), a absorção varia de 2% a 6% para agregados reciclados graúdos e de 4% a 8% para agregados miúdos.

De acordo com Frazão (2002) *apud* Leite (2007), a alta capacidade de absorção pode implicar em queda da resistência mecânica por enfraquecimento das ligações intergranulares.

Silva (2009) verificou que para os ARC analisados, compostos por 89% de materiais cimentícios, a absorção analisada foi considerada elevada, entre 8% e 10% e porosidade acentuada variando entre 17% e 20%.

Torres *et al.* (2010) explicam que muitos podem ser os fatores ambientais que contribuem para a degradação das misturas betuminosas, porém a água parece ser o principal agente de deterioração, pois faz com que o agregado perca a aderência com o ligante. Essa situação, representada na Figura 2.6, pode originar a diminuição

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

da rigidez ou da resistência da mistura betuminosa ou causar a perda de ligação entre a emulsão betuminosa e os agregados. Esse fenômeno é conhecido como perda de adesividade ou descolagem e pode ser medido através do ensaio Lottman.

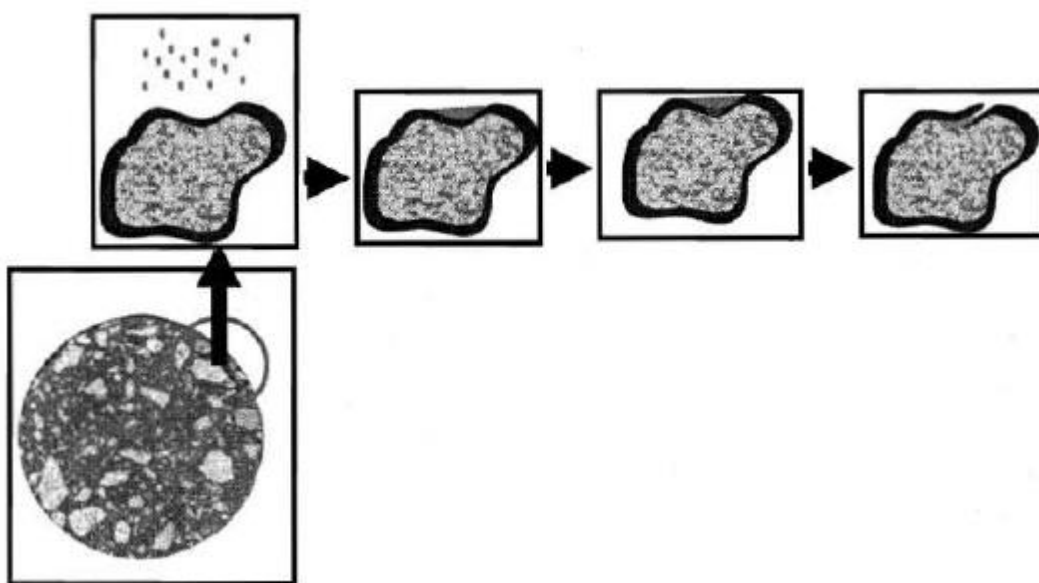


Figura 2.6 – Ilustração dos danos causados pela água na mistura (KIM; LUTIF, 2006 apud TORRES et al., 2010).

2.6.5. Massa específica aparente

De acordo com a bibliografia pesquisada, verifica-se que a massa específica dos agregados reciclados é inferior a dos agregados naturais.

Segundo Hansen (1992) *apud* Lima (1999) a massa específica do ARC chega a ser 5 a 10% mais baixa do que os agregados que o originaram devida à significativa presença de argamassa aderida.

Paranavithana e Mohajerani (2006) compararam os resultados obtidos nos ensaios de densidade real, densidade aparente e absorção dos ARC, do agregado natural de basalto e da combinação do ARC com o agregado natural. Devido à alta porosidade e baixa densidade das partículas de argamassa de cimento ligadas ao ARC, observou-se que os ARC apresentaram menores densidades e absorção à água bem superior quando comparados aos agregados naturais de basalto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na Tabela 2.23 é apresentado um comparativo entre os resultados de diferentes pesquisas com agregados reciclados de concreto quanto às seguintes propriedades: absorção, massa específica real, massa específica saturada superfície seca, massa específica aparente, desgaste por abrasão Los Angeles, índice de forma e lamelaridade.

Tabela 2.23 – Comparativo entre os resultados de diferentes pesquisas com agregados reciclados de concreto (autora, 2013).

Procedência do agregado reciclado	Graduação	Absorção (%)	Massa específica real (g/cm³)	Massa específica SSS (g/cm³)	Massa específica aparente (g/cm³)	Abrasão Los Angeles (%)	Índice de forma	Lamelaridade	Pesquisador
GRAÚDOS									
Coruña, Espanha	Graúdo	6,10%	N/A	N/A	2,58	39,65 %	N/A	N/A	Pérez <i>et al.</i> (2007)
Belo Horizonte/MG	Graúdo Brita 1	8,05%	2,559	2,117	N/A	47,0%	0,88	N/A	Silva (2009)
Belo Horizonte/MG	Graúdo Brita 0	9,64%	2,594	2,061	N/A	N/A	N/A	N/A	Silva (2009)
Fortaleza/CE	Graúdo	2,60%	2,60	N/A	2,44	40,78 %	0,73	N/A	Ron <i>et al.</i> (2008)
Manaus/AM	Graúdo	11,00%	2,350	N/A	N/A	40%	N/A	N/A	Frota <i>et al.</i> (2006) <i>apud</i> Marinho (2011)
Manaus/AM	Graúdo	9,00%	2,337	N/A	N/A	44%	N/A	N/A	Frota <i>et al.</i> (2004) <i>apud</i> Marinho (2011)
Goiânia/GO	Graúdo	N/A	2,680	N/A	N/A	33%	0,9	N/A	Guimarães; Ribeiro (2005)
Melbourne, Australia	Graúdo	5,90%	2,333	2,471	2,706	N/A	N/A	N/A	Paranavithana; Mohajerani (2006)
Rasht, Irã	Graúdo	N/A	2,457	2,471	2,484	25,5%	N/A	9,3%	Arabani; Azarhoosh (2012)
Michigan, USA	Graúdo	2,34%	2,692	2,586	2,433	43%	N/A	3,75%	Mills-beale; You (2010)
Recife/PE	Graúdo Brita 25	4,25%	2,346	N/A	N/A	43,40 %	0,75	N/A	Marinho (2011)
Recife/PE	Graúdo Pedrisco	6,50%	2,214	N/A	N/A	46,65 %	N/A	N/A	Marinho (2011)
Belo Horizonte/MG	Graúdo					52%	2,9		Fernandes (2004)

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Continuação da Tabela 2.23 – Comparativo entre os resultados de diferentes pesquisas com agregados reciclados de concreto (autora, 2013).

Procedência do agregado reciclado	Graduação	Absorção (%)	Massa específica real (g/cm³)	Massa específica SSS (g/cm³)	Massa específica aparente (g/cm³)	Abrasão Los Angeles (%)	Índice de forma	Lamelaridade	Pesquisador
GRAÚDOS									
Nanyang, Singapura	Graúdo	N/A	2,44	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Wong <i>et al.</i> (2007)
Wuhan, China	Graúdo	6,76%	N/A	N/A	2,584	37,8%	N/A	9,9%	Zhu <i>et al.</i> (2011)
Flórida, USA	Graúdo	4,36%	2,43	N/A	N/A	33,9%	N/A	N/A	Chini <i>et al.</i> (2001)
VALOR MÁXIMO		11,00%	2,69	2,59	2,71	52,00%	2,90	9,90%	-
VALOR MÉDIO		6,38%	2,46	2,34	2,54	40,51%	1,23	7,65%	-
VALOR MÍNIMO		2,34%	2,21	2,06	2,43	25,50%	0,73	3,75%	-
MIÚDOS									
Goiânia/GO	Miúdo	N/A	2,68	N/A	N/A	(1)	(1)	(1)	Guimarães; Ribeiro (2005)
Melbourne, Australia	Miúdo	1,30%	2,701	2,735	2,798	(1)	(1)	(1)	Paranavithana; Mohajerani (2006)
Rasht, Irã	Miúdo	N/A	2,463	2,477	2,496	(1)	(1)	(1)	Arabani; Azarhoosh (2012)
Wuhan, China	Miúdo	N/A	2,637	N/A	N/A	(1)	(1)	(1)	Chen <i>et al.</i> (2011)
Wuhan, China	Miúdo	16,80%	N/A	N/A	2,629	(1)	(1)	(1)	Zhu <i>et al.</i> (2011)
Belo Horizonte/MG	Miúdo	N/A	2,533	N/A	N/A	(1)	(1)	(1)	Silva (2009)
VALOR MÁXIMO		16,80%	2,70	2,74	2,80	(1)	(1)	(1)	-
VALOR MÉDIO		9,05%	2,60	2,61	2,64	(1)	(1)	(1)	-
VALOR MÍNIMO		1,30%	2,46	2,48	2,50	(1)	(1)	(1)	-

(1) Ensaio realizado apenas para agregados graúdos

2.7. Propriedades do concreto betuminoso usinado a quente com agregados reciclados de concreto

São inúmeras as variáveis que influenciam as propriedades de uma mistura, capacidade de distribuir tensões (rigidez), estabilidade, durabilidade, resistência à fadiga. Estas propriedades são apresentadas por Monismith *et al.* (1998) *apud* Wesseling (2005) conforme Tabela 2.24.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tabela 2.24 – Variáveis que afetam as propriedades da mistura (MONISMITH et al., 1989 apud WESSELING, 2005).

Propriedade	Definição	Exemplo de variáveis de mistura que têm influência
Rigidez	Relação entre tensão e deformação à determinada temperatura e tempo de carregamento	Granulometria
		Rigidez do asfalto
		Grau de compactação
		Sensibilidade à água
		Teor de ligante
Estabilidade	Resistência à deformação permanente (geralmente a altas temperaturas e longos tempos de carregamento)	Textura superficial do agregado
		Granulometria
		Rigidez do asfalto
		Grau de compactação
		Sensibilidade à água
Durabilidade	Resistência ao intemperismo (ar, água) e à ação abrasiva do tráfego	Teor de ligante
		Granulometria
		Grau de compactação
		Sensibilidade à água
Resistência à fadiga	Habilidade da mistura deformar-se sob carregamento repetido sem romper	Granulometria
		Teor de ligante
		Grau de compactação
		Rigidez do asfalto
		Sensibilidade à água
Características de fratura	Resistência da mistura sobre aplicação de carga	Granulometria
		Tipo de agregado
		Teor de ligante
		Grau de compactação
		Rigidez do asfalto
		Sensibilidade à água
Atrito	Habilidade da mistura de prover adequado coeficiente de atrito entre o pneu e o pavimento molhado	Textura do agregado
		Resistência ao polimento
		Granulometria
		Teor de ligante
Permeabilidade	Habilidade do ar, água e vapor d'água mover-se através da mistura	Granulometria
		Teor de ligante
		Grau de compactação

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O comportamento das misturas asfálticas é dependente das características dos agregados e do ligante (características de deformabilidade plástica e de fadiga), por isso é tão evidente a importância da seleção desses materiais, bem como sua interação, para o bom desempenho da mistura final. Na Figura 2.7 está apresentada uma tentativa de quantificação do percentual de influência de agregados e ligante, para cada uma das três patologias mais comuns em pavimentos asfálticos.

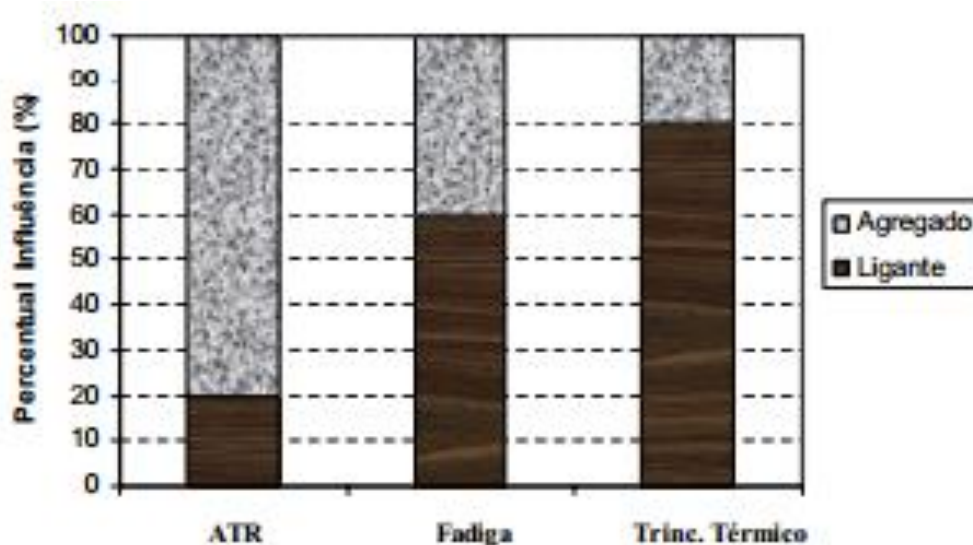


Figura 2.7 – Influência do agregado e do ligante no desempenho do CBUQ (FHWA, 2002 apud WESSELING, 2005).

Quanto à utilização de agregado reciclado de concreto em concreto betuminoso usinado a quente, alguns pesquisadores (WONG *et al.*, 2007; MILLS-BEALE; YOU, 2010) verificaram durabilidade adequada e bons resultados nas propriedades volumétricas e mecânicas. Por outro lado, outros pesquisadores (PARANAVITHANA; MOHAJERANI, 2006; PÉREZ *et al.*, 2011), observaram que, apesar de num primeiro momento os CBUQ produzidos com agregados reciclados de concreto apresentarem bons resultados volumétricos e mecânicos, devido à ação da água, provaram ter durabilidade insuficiente.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.7.1. Teor ótimo de ligante

A absorção do ligante pelo agregado reciclado é fato indiscutível e consenso entre todos os estudos. Apesar de o agregado reciclado demorar mais que o natural para ser totalmente envolvido pelo ligante, no momento da extração do betume, o agregado reciclado apresenta maior resistência para ficar totalmente livre do ligante, sendo visível a presença do ligante nos poros desse tipo de agregado (MARINHO, 2011).

Em um estudo realizado por Aldigueri *et al.* (2004), os pesquisadores verificaram uma diferença de 0,6% no teor ótimo de ligante entre misturas executadas com compactador manual e outras com compactador automático, devido a variações na frequência de aplicação dos golpes, que ocasionavam diferenças nos resultados das densidades aparentes e dos volumes de vazios das misturas.

Wong *et al.* (2007) explicam que uma estrutura porosa, encontrada nos ARC, também se traduz em mais vazios e uma maior área de superfície, requisitando assim uma maior porcentagem de ligante. No entanto, existe um fator positivo, uma estrutura mais porosa preenchida com o ligante, pode gerar uma mistura mais elástica, resultando em maior resistência à deformação.

Pérez *et al.* (2011) explicam que a alta taxa de absorção do agregado reciclado de concreto é uma propriedade que incentiva o deslocamento do betume pela água, originando a perda de adesividade dos agregados e uma perda generalizada de propriedades mecânicas.

É consenso no meio acadêmico que a argamassa de cimento aderido ao agregado graúdo que conferem essa alta absorção de água no material. Por isso, se torna importante realizar uma pesquisa mais extensa para estudar o comportamento durabilidade do CBUQ feito com agregado reciclado de concreto (PÉREZ *et al.*, 2011).

Mills-Beale e You (2010) verificaram que a absorção de uma parcela do asfalto pelos poros do agregado era proporcional ao aumento da quantidade de agregado reciclado de concreto, reduzindo, assim, o conteúdo efetivo de asfalto na mistura.

Apesar do foco desse capítulo se tratar da utilização de ARC em CBUQ, é importante mencionar o estudo de Branco (2004), que estudou a substituição de

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

agregados naturais no CBUQ por escória de aciaria, que possui altos teores de absorção e elevada porosidade, Para explicar o fenômeno a pesquisadora apresenta um esquema que representa a interação ligante-agregados para a compensação da heterogeneidade do material, apresentado na Figura 2.8.

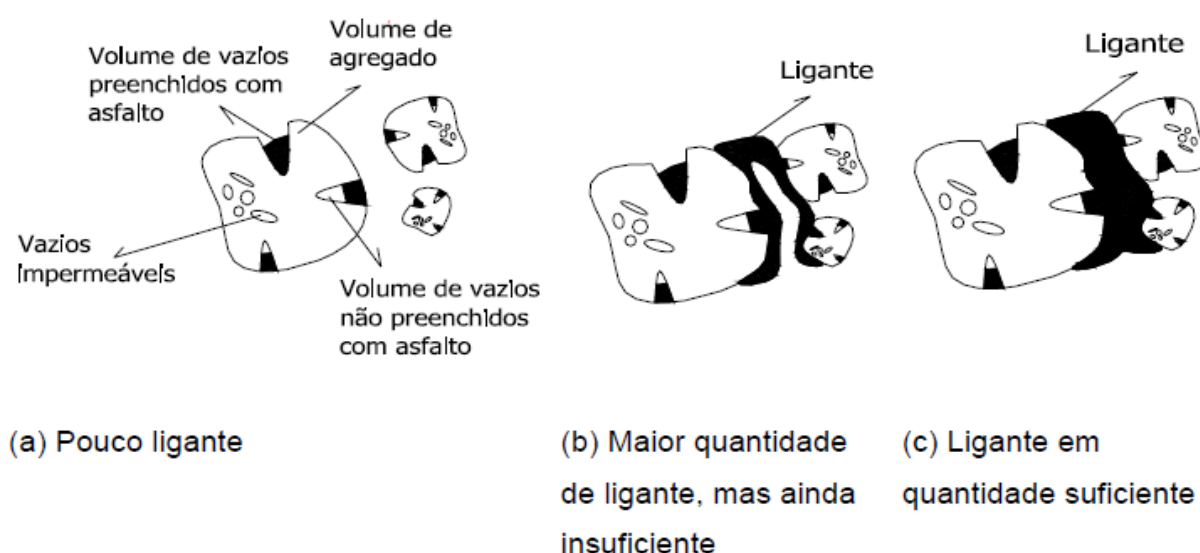


Figura 2.8 – Esquema da interação ligante-agregado para a compensação da heterogeneidade do material (BRANCO, 2004).

Silva (2009) constatou que a absorção do ligante, devido à alta porosidade dos agregados estudados (entre 17% e 20%), é 73% mais elevada nas misturas com CAP 30/45 da faixa B e 62% maiores nas misturas da faixa C com o mesmo ligante, quando comparadas às misturas com CAP 50/70, contribuindo para enfatizar a questão afirmada por Wesseling (2005), de que o comportamento das misturas asfálticas são dependentes das características dos agregados e do ligante. Silva (2009) ainda verificou que nas misturas estudadas com CAP 30/45 na faixa B do DNIT, foram absorvidos 38% do ligante contra 19% da mistura na faixa B com CAP 50/70. No caso das misturas da faixa C, a absorção do ligante chegou a 41% com CAP 30/45 e 22% com CAP 50/70.

Na pesquisa de Zhu *et al.* (2011), o pré-tratamento de agregado graúdo reciclado por resina de silicone líquido diminuiu a absorção de asfalto da mistura em 88,8%.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O excesso de ligante causa fluência excessiva, escorregamentos de massa, exsudação e deformação permanente. Por outro lado, a escassez incorre em excesso de vazios com ar e desagregação ou trincamento precoce do concreto asfáltico (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Segundo Vasconcelos (2003), um revestimento pode desagregar, ou trincar, caso haja deficiência de menos de 0,5% de ligante asfáltico em relação ao valor de ótimo de ligante. Assim como pode apresentar exsudação e deformação permanente caso haja 0,5% de excesso.

Silva (2009) verificou teores ótimos de ligante variando entre 9,0% e 9,5%, em todas as misturas realizadas, sendo superiores ao comumente utilizado na região, nas misturas realizadas com agregado natural.

Wong *et al.* (2007) verificaram teores ótimos de ligante de 5,3%, 6,5%, 7,0%, para a mistura com 6% de agregado de concreto (< 0,075 mm) não tratado termicamente, com 45% de agregado de concreto (< 3,15 mm) não tratado termicamente e com 45% de agregado de concreto (< 3,15 mm) tratado termicamente, respectivamente. O maior teor de ligante obtido para mistura com 45% de agregado de concreto termicamente tratado pode ser parcialmente atribuído à textura mais porosa da superfície do agregado de concreto.

Guimarães e Ribeiro (2005) constataram teor ótimo de ligante 8% para as misturas com agregado reciclado de CCR, sendo que a mistura referência apresentou 5,5% de teor ótimo de ligante. Apesar das misturas com agregado de CCR estarem de acordo com as especificações, apresentaram alto consumo de CAP quando comparadas à mistura de referência. O elevado teor ótimo de ligante foi atribuído à alta porcentagem de vazios decorrentes da porosidade e absorção dos agregados reciclados.

Ron *et al.* (2008) também verificaram aumento do teor de ligante de 5,7% para 7,6% nas misturas em que houve substituição de agregado natural por agregado reciclado.

Paranavithana e Mohajerani (2006) concluíram que o teor ótimo de asfalto é maior para as amostras feitas com os agregados reciclados miúdos em comparação com aqueles feitos com agregados graúdos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Frota *et al.* (2004) *apud* Marinho (2011), Ron *et al.* (2008) e Silva (2009), consideraram que o aumento no teor de ligante das misturas devia-se ao fato da alta porosidade e absorção dos agregados reciclados. Além disso, verifica-se que esses pesquisadores utilizaram filer na dosagem das misturas, e, provavelmente o aumento na superfície específica dos grãos, ocasionada pela presença dos finos do filer, contribuíram para o aumento no consumo do ligante.

Existe uma possibilidade do acréscimo no teor de ligante observado nas pesquisas anteriores desestimular o uso deste material, em função do custo elevado do ligante. Segundo Bernucci *et al.* (2006), o CAP representa de 25% a 40% do custo da construção do revestimento. Os pesquisadores consideram que uma das formas de reduzir a sensibilidade das misturas betuminosas a pequenas variações do teor de ligante, mesmo dentro do admissível em usinas de asfalto, e torná-las ainda mais resistentes e duráveis em vias de tráfego pesado, é substituir o ligante asfáltico convencional por asfalto-borracha ou por ligante modificado por polímero.

2.7.2. Densidade da mistura

Verifica-se que a densidade sobre os agregados das amostras de concreto asfáltico compactado contendo ARC costumam ser menores que nas amostras da mistura de controle. Provavelmente devido à porosidade dos ARC, maior em comparação à porosidade do agregado natural, propriedade já verificada nessa dissertação.

Paranavithana e Mohajerani (2006) explicam que os agregados reciclados de concreto diferem dos agregados naturais devido à pasta de cimento que envolve a superfície do agregado natural original, utilizado para a execução do concreto, após o processo de reciclagem. Esta pasta de cimento é altamente porosa e contribui para que os agregados reciclados de concreto apresentem menor densidade e maior porosidade das partículas, além de causar variações na qualidade do agregado reciclado de concreto e elevada absorção de água.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.7.3. Volume de vazios (V_v)

Segundo o Asphalt Institute, o volume de vazios ($V_v\%$) é a propriedade volumétrica mais importante do concreto asfáltico, pois, os vazios de ar dentro da mistura compactada irão permitir a expansão térmica dos ligantes e suportar a compactação causada pelo tráfego. Volumes de vazios muito baixos, abaixo de 3% comprometem o desempenho das misturas quanto ao afundamento em trilhas de rodas, por outro lado, $V_v\%$ elevados, acima de 8% comprometem a durabilidade do pavimento. Misturas com $V_v\%$ entre 6% e 13% não são consideradas nem impermeáveis nem drenantes, tornando-se mais susceptíveis ao dano por umidade induzida (MARINHO, 2011).

Cross e Brown (1992) realizaram um amplo estudo em rodovias norte-americanas e ressaltaram a importância de manter o volume de vazios acima de 3% (mesmo após adensamento pelo tráfego) e da utilização de agregados com faces britadas para evitar o afundamento em trilhas de rodas.

O volume de vazios é um dos fatores condicionantes que mais afeta a durabilidade das misturas asfálticas em serviço. A permeabilidade das misturas sofre influência de diversos fatores, porém as normas nacionais e internacionais fixaram, arbitrariamente, os valores de $V_v\%$ e acredita-se que: volume de vazios baixos, entre 3% e 5% indicam misturas impermeáveis, enquanto que volume de vazios elevados, maiores que 14% conduzem a misturas permeáveis. Hicks (1991) *apud* Wesseling (2005) define a faixa intermediária (com V_v entre 8% e 13%) como “pessimum air voids”, considerada indesejável devido à possibilidade da entrada de água por gravidade no interior da mistura e retenção desta água, que não consegue sair, pois na faixa intermediária a mistura não possui vazios suficientes para ser drenante.

Paranavithana e Mohajerani (2006) verificaram maior volume de vazios para as amostras com agregados reciclados de concreto em comparação com a amostra referência. Os autores concluíram também que o volume de vazios diminui com o aumento do teor de ligante asfáltico, pois, semelhante à massa específica, a quantidade de vazios de ar reduz quanto maior for a quantidade de pasta de asfalto. Isto ocorre devido ao fato de que ligante asfáltico inicialmente tende a preencher os vazios e, uma vez que esses espaços vazios foram preenchidos, chega um momento em que o volume de vazios de ar torna-se independente da quantidade de

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

asfalto misturado. Os autores concluíram ainda que a quantidade de vazios de ar encontrados quando da substituição por frações de agregado miúdo é maior quando comparadas com as frações de substituição por agregado graúdo. Esse fator é justificado devido à maior área de superfície específica dos agregados miúdos, que exigem mais asfalto para preencher os poros e, conseqüentemente, uma maior quantidade de asfalto é necessária para preencher os vazios nas amostras de agregado miúdo em comparação com os feitos dos agregados graúdos.

Marinho (2011) verificou volumes de vazios muito próximos da mistura referência para todas as misturas estudadas, exceto para a mistura com 100% de ARC, que apresentou resultados bem diferenciados do volume de vazios para os mesmos percentuais de ligante das demais misturas. A pesquisadora verificou uma relação entre a absorção ponderada das misturas e o volume de vazios, conforme Figura 2.9, sendo que quanto maior a absorção dos agregados, menor o Vv, indicando que parte do ligante das misturas é absorvida pelos agregados que a constituem.

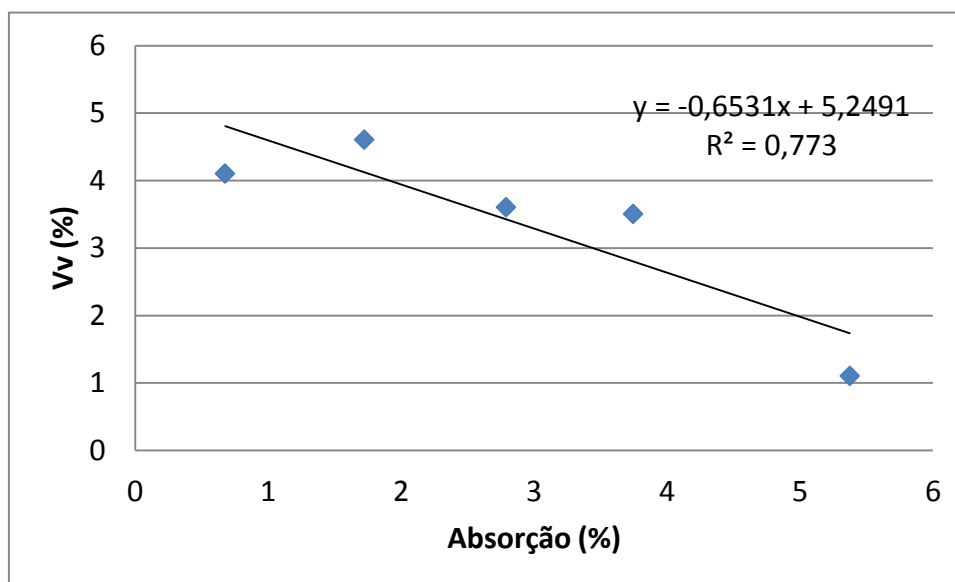


Figura 2.9 – Vv versus absorção de água (MARINHO, 2011).

Guimarães e Ribeiro (2005) concluíram que os agregados mistos não são indicados para uso em misturas betuminosas, pois para o agregado misto, mesmo com alto teor de ligante, 13%, foram obtidos resultados em desacordo com os

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

parâmetros especificados. Com relação ao volume de vazios, os autores obtiveram resultados variando entre 10,6% e 18,7%, bem acima do que indica a DNIT-ES 031:2006, entre 3% e 5%, e baixa relação betume/vazios, entre 43% e 66%, abaixo do que também determina a especificação de serviço, entre 75% e 82%. Já o volume de vazios e a relação betume vazios do agregado de CCR cumpriram com as exigências da norma para um teor de ligante de 8,0%.

Ron *et al.* (2008) constataram que o aumento do teor de ligante, a modificação da granulometria e o aumento do número de golpes não foram suficientes para reduzir o volume de vazios das misturas estudadas, que permaneceu superior a 7%. A redução desse valor só foi possível com a substituição de parte do fíler proveniente do agregado reciclado por carbonato de cálcio, conseguindo chegar a um volume de vazios igual a 2%, quando substituiu 80% do filer por carbonato de cálcio.

2.7.4. Vazios cheios de betume (VCB)

O percentual de vazios cheios de betume (VCB) depende diretamente das densidades dos materiais das misturas (agregados e ligante) e do percentual de ligante.

Marinho (2011) não verificou nenhuma alteração significativa nos valores da porcentagem de vazios cheios de betume para um mesmo teor de ligante de 5% nas cinco misturas, incluindo a mistura referência. No entanto, percebeu que à medida que se aumenta o percentual de ARC nas misturas, há uma diminuição no VCB, para um mesmo teor de ligante. Tal fato pode ser ocasionado em função da menor densidade aparente do agregado reciclado quando comparada ao agregado natural. Outra justificativa encontrada pela pesquisadora é com relação ao diâmetro nominal máximo do agregado reciclado utilizado, igual 25 mm, fato pode ter contribuído para o teor de ligante permanecer inalterado nas misturas com ARC, em função da menor superfície específica, pois em todas as misturas a relação agregado graúdo/agregado miúdo foi constante.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.7.5. Vazios do agregado mineral (VAM)

A porcentagem de vazios do agregado mineral, VAM, é a soma do volume de vazios, V_v , não preenchidos pelo ligante, com os vazios preenchidos pelo ligante, VCB. Em resumo, VAM é o volume total de vazios da mistura.

Paranavithana e Mohajerani (2006), Mills-Beale e You (2010) verificaram que os vazios do agregado mineral das amostras de concreto asfáltico compactado contendo ARC foram menores que nas amostras da mistura de controle, devido à maior absorção de ligante pelo ARC. Os pesquisadores acreditam que, devido à superfície porosa do ARC, causou-se maior absorção do ligante, diminuindo os VAM.

Acredita-se que pequenos valores de VAM e baixos teores de ligante podem comprometer o desempenho à fadiga e a durabilidade das misturas, indicando que o filme de ligante delgado recobrindo os agregados é insuficiente. Porém, valores de VAM excessivamente altos podem levar à redução da resistência ao cisalhamento e perda do intertravamento do esqueleto mineral.

Hislop e Coree (2000) acreditam que a granulometria e a textura superficial dos agregados são melhores indicadores de valores críticos para o parâmetro VAM. Segundo estes pesquisadores, especificar um valor mínimo de VAM baseando-se apenas no tamanho máximo nominal, conforme as normas brasileiras determinam, pode ser irrealista.

2.7.6. Fluência Marshall

Paranavithana e Mohajerani (2006) verificaram que as misturas com ARC apresentaram resultados semelhantes aos da mistura de controle com relação ao ensaio de fluência e, além disso, verificaram que a fluência reduzia com o aumento no nível de compactação das misturas.

2.7.7. Estabilidade Marshall

No trabalho de Frota *et al.* (2004) *apud* Marinho (2011) os resultados demonstraram que as misturas com argila calcinada e com agregado reciclado apresentaram maiores estabilidades que a mistura com seixo (agregado comum na

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

região), apesar deste ser individualmente mais resistente, fato que deve, provavelmente, ao fato de que o seixo possui superfície lisa e forma arredondada, dificultando o intertravamento das partículas na mistura e, conseqüentemente, diminuindo a estabilidade do conjunto. Já a argila calcinada e o agregado reciclado possuem formas angulares e superfícies porosas, o que aumenta a resistência ao cisalhamento interno das misturas.

2.7.8. Módulo de elasticidade

Apesar de o agregado de concreto possuir maior cubicidade que o agregado natural de granito, sob compactação os finos de concreto podem quebrar, gerando mais finos que preenchem os vazios das misturas de CBUQ, melhorando assim a integridade estrutural da mistura. Isto dá uma possível explicação para maiores valores de módulo de elasticidade obtidos por Wong *et al.* (2007).

2.7.9. Módulo de resiliência (MR)

O módulo de resiliência é uma medida da rigidez do material. Quanto maior o módulo de resiliência, maior a capacidade de suporte de carga. Como o nome indica, o módulo de resiliência inclui a deformação horizontal recuperável nos cálculos.

Os estudos têm demonstrado que o MR dos materiais viscoelásticos varia em função do tempo de aplicação da carga e do tempo de repouso, pois o deslocamento recuperável decorre de ambos. O MR de misturas asfálticas a quente sofre variações também com o tipo de mistura, a faixa granulométrica, o tipo de ligante asfáltico, as propriedades volumétricas, a energia de compactação, a temperatura de compactação, a temperatura de realização do ensaio, entre outras.

Como a compactação na dosagem Marshall é realizada por impactos e na dosagem SUPERPAVE por amassamento, a estrutura do esqueleto mineral das misturas moldadas por estes dois processos é diferente, ainda que sejam utilizados os mesmos agregados e mesmos teores e tipo de ligante no traço, o que pode resultar em valores diferentes para as propriedades mecânicas de MR e de RT.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Marinho (2011) verificou que os resultados de MR para as misturas com ARC foram um pouco menores que na mistura de referência. Conclui-se que as misturas com ARC têm menores valores de rigidez em relação à mistura de controle. A razão pode ser devido à porosidade existente nos agregados reciclados, tanto em seu interior como na de argamassa de baixa resistência aderida às partículas de ARC, que os tornam agregados com menor módulo de elasticidade.

Paranavithana e Mohajerani (2006) verificaram que o aumento no nível de compactação melhorou o módulo de resiliência e a capacidade de suporte e diminuiu a fluência. Além disso, o módulo de resiliência das misturas com ARC diminuiu com o aumento na quantidade de ligante, e os valores de MR encontrados para essas misturas foram significativamente menores quando comparados aos valores correspondentes da mistura de controle. No entanto, os valores estavam dentro dos limites aceitáveis recomendados pelo Austroads Pavement Research Group.

Ron *et al.* (2008) verificaram resultados de resistência à tração por compressão diametral (RT) e de módulo de resiliência (MR) de mesma ordem de grandeza para o CBUQ produzido com agregado natural e reciclado.

Wong *et al.* (2007) obtiveram menores valores para os ensaios de módulo de resiliência realizados a temperaturas mais altas, basicamente devido a uma mistura mais macia, com menor rigidez, à temperatura mais elevada. Os resultados de MR das misturas com 6% de substituição de agregado natural por ARC foram semelhantes aos da mistura de referência. O MR do CBUQ com 45% de substituição de agregado natural por ARC tratado termicamente foi um pouco menor que na mesma mistura com concreto não tratado termicamente.

Mills-Beale e You (2010) verificaram que o MR diminuiu com o aumento na quantidade de ARC na mistura, entretanto, assim como Wong *et al.* (2007), os resultados sofreram influência da temperatura, indicando um aumento no MR com a diminuição da temperatura de ensaio. Os pesquisadores consideraram mais expressiva a influência da temperatura de teste do que a variação na quantidade de agregados de concreto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Arabani e Azarhoosh (2012), por sua vez, verificaram que as misturas asfálticas com agregados reciclados de concreto e agregados de escória de aciaria chegaram a apresentar módulo de resiliência maior que a mistura de referência.

Pela revisão bibliográfica realizada, observa-se que os valores normalmente obtidos para módulo de resiliência de misturas asfálticas a quente variam de 2.000 a 8.000 MPa, em misturas ensaiadas a 25°C. Os menores valores de MR correspondem às misturas com asfaltos modificados por borracha ou polímeros e os valores mais elevados são relativos às misturas com asfaltos de consistência mais dura.

As misturas com elevados valores de módulo de resiliência (entre 12.000 a 20.000 MPa), consideradas semi-rígidas do ponto de vista da deformabilidade, sendo indicadas para as camadas de base dos pavimentos (BERNUCCI *et al.*, 2006).

2.7.10. Resistência à tração

Valores altos de RT (alta resistência à tração) geralmente indicam maior resistência na ruptura e, conseqüentemente, maior resistência à fadiga.

Ron *et al.* (2008) concluiu que os resultados de resistência à tração por compressão diametral (RT) e de módulo de resiliência (MR) são de mesma ordem de grandeza para o CBUQ produzido com agregado natural e reciclado.

Porém, Silva (2009) verificou influência do tipo de CAP e da granulometria nessa propriedade, sendo que nas misturas dosadas com CAP 30/45, a RT da faixa B ficou 15% acima do valor de RT da faixa C. Inversamente, nas misturas com CAP 50/70, o valor de RT para a faixa C foi 24% superior ao valor de RT da faixa B.

Marinho (2011) verificou que a RT tende a reduzir com o aumento no teor de ARC na composição das misturas. No entanto, pode-se verificar que, mesmo com 100% de AGR é possível obter valores de RT aceitáveis e pouco diferentes dos resultados da mistura de referência.

Segundo Bernucci *et al.* (2006) os valores médios de RT para as misturas asfálticas à quente situam entre 0,5 MPa e 2,0 MPa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.7.11. Vida de fadiga

Com a realização do ensaio de vida de fadiga, a intenção é simular em laboratório o que ocorre em campo, através da relação entre o número de golpes sofridos pelo corpo de prova até o seu rompimento e o número de ciclos dos pneumáticos dos veículos, em campo, até o rompimento da camada do pavimento. Porém, existem diferenças significativas com relação ao tempo e frequência de aplicação da carga, temperatura e valor do módulo de resiliência das camadas constituintes do pavimento, que não podem ser simulados em laboratório (MARINHO, 2011). Este é o motivo pelo qual cada vez mais vem se optando no meio científico pela confecção de pistas-teste para melhor análise do comportamento real dos pavimentos. Conforme já mencionado, não foi encontrada na bibliografia pesquisa uma pista teste executada com a substituição de agregados naturais por agregados reciclados de concreto no CBUQ.

Ron *et al.* (2008) comprovaram que a menor relação MR/RT pode ser indicativa de uma maior resistência à fadiga. Para essa pesquisa, a relação MR/RT das misturas com agregados reciclados ficou um pouco abaixo da mistura de referência. Considera-se que valor inferior é satisfatório por indicar maior flexibilidade, menor MR, e maior resistência, maior RT.

2.7.12. Deformação permanente

De acordo com Medina (1997) *apud* Leite (2007), as deformações permanentes, irreversíveis, estão presentes seja nas trilhas de rodas dos caminhões nas estradas de revestimento asfáltico, constituindo um fator importante no projeto de pavimentos flexíveis.

Mills-Beale e You (2010) verificaram que as deformações permanentes aumentaram com o acréscimo de ARC nas misturas. Os autores observaram que quando substituídos entre 25% e 35% de agregado natural por ARC, houve um aumento de 8,1% nas deformações permanentes, entre 35% e 50%, houve um aumento de 37,85% nas deformações permanentes; e, entre 50% e 75%, houve um aumento de 76% nas deformações permanentes. Porém, para todas as misturas as deformações permanentes são menores que 8 mm.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Arabani e Azarhoosh (2012) verificaram valores de deformação permanente 40% menor para as misturas asfálticas com agregados reciclados de concreto e agregados de escória de aciaria, que a deformação permanente da mistura referência.

Pérez *et al.* (2011) verificaram que o CBUQ projetado com ARC graúdo atende os parâmetros Marshall para estradas de baixo volume e apresentam boa resistência quanto à deformação permanente.

2.7.13. Envelhecimento

Existe a tendência de enrijecimento das misturas com o tempo, desta forma com o envelhecimento da mistura, os valores da RT tendem a aumentar, caracterizando uma perda de flexibilidade e consequente aumento do MR.

Frota *et al.* (2005) *apud* Marinho (2011) afirmam que as misturas envelhecidas, através de envelhecimento controlado em estufa não ventilada, apresentaram uma rigidez maior por conta da perda de material volátil do ligante. Este aumento da rigidez, provocado pelo envelhecimento do ligante nas misturas, torna o revestimento mais susceptível a microtrincas quando solicitado pelo tráfego, levando a uma sensível diminuição na vida de fadiga deste material.

A Tabela 2.25 apresenta os resultados dos parâmetros volumétricos e mecânicos da dosagem Marshall, bem como ensaios mecânicos, conforme pesquisas anteriores verificadas na revisão bibliográfica realizada, referente à utilização de agregado reciclado de concreto em concreto betuminoso usinado a quente.

Na Tabela 2.26 são apresentadas as variações das propriedades do concreto betuminoso usinado a quente com a utilização de agregado reciclado de concreto, em comparação às misturas referências das pesquisas analisadas.

Marinho (2011) explica que o comportamento das misturas betuminosas vem sendo estudado com afinco em diversos países do mundo e percebe-se uma forte tendência de se adequar métodos antigos e projetar as misturas de acordo com as solicitações de tráfego, estrutura, condições climáticas e demais peculiaridades de cada região, criando-se novas misturas. Como consequência dos avanços

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

internacionais, a pesquisadora cita que alguns ensaios têm sido acrescentados à rotina dos projetos de camadas asfálticas como, por exemplo, os ensaios de módulo de resiliência (MR), resistência à tração (RT) e vida de fadiga, que complementam os resultados do ensaio de estabilidade (E) e fluência (F).

De fato, verificam-se diversos trabalhos com a execução de tais ensaios, porém, poucos trabalhos até agora estudaram os efeitos da utilização do agregado reciclado de concreto quanto à deformação permanente e aos efeitos da umidade. Das pesquisas estudadas na revisão bibliográfica verificou-se apenas uma que realizou o ensaio de deformação permanente na mesa compactadora e simulador de tráfego LCPC, o de Silva (2009), e nenhum que realizou o ensaio Lottman. Desta maneira, esse trabalho preenche parte dessa lacuna verificada, através da realização do ensaio de deformação permanente na mesa compactadora e simulador tipo LCPC, e do ensaio de resistência da mistura asfáltica compactada ao dano por umidade induzida, comumente conhecido como ensaio Lottman.

Tabela 2.25 – Resultados de pesquisas anteriores (autora, 2013).

Pesquisador	Traços estudados	% de ligante na mistura	Densidade (g/cm³)		Vvazios	VA M	VC B	RB V	Estabilidade	Fluência (mm)	MR (MPa)	RT (MPa)	MR/RT	Deformação permanente (%)
			Aparente	Teórica	(%)	(%)	(%)	(%)	(kgf)					
Marinho (2011)	0% ARC	5	2,399	2,502	4,1	11,6	15,8	74	857	5,28	6806,67	1,94	3503,2	N/A
	25% ARC	5	2,316	2,428	4,6	11,3	15,9	72,6	724	4,92	5369	1,7	3164,8	N/A
	50% ARC	5	2,317	2,396	3,6	11,2	14,5	75,4	804	5,2	5697	1,83	3106,3	N/A
	75% ARC	5	2,284	2,353	3,5	11,1	14	75,7	636	3,35	5818,11	1,82	3195	N/A
	100% ARC	5	2,266	2,289	1,1	11	12	91,8	551	3,86	5083	1,87	2713,8	N/A
Arabani; Azarhoosh (2012)	Mistura de controle	5,1	N/A	N/A	2,61	14,4	N/A	N/A	1697	2,95	948	N/A	N/A	7,91
	FA: ARC	5,6	N/A	N/A	2,4	13,1	N/A	N/A	1946	2,67	1365	N/A	N/A	5,93
	CA: ARC	6,5	N/A	N/A	7,25	11,7	N/A	N/A	1297	3,24	793	N/A	N/A	11,33
	FA: SS	5,3	N/A	N/A	2,87	15,1	N/A	N/A	1712	2,81	1084	N/A	N/A	6,96
	CA: SS	5,5	N/A	N/A	3,02	15,5	N/A	N/A	2023	2,51	1896	N/A	N/A	5,34
	FA: ARC + CA: SS	5,9	N/A	N/A	2,73	14,5	N/A	N/A	2281	2,3	2228	N/A	N/A	4,75

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Continuação da Tabela 2.25 – Resultados de pesquisas anteriores (autora, 2013).

Pesquisador	Traços estudados	% de ligante na mistura	Densidade (g/cm³)		Vvazios (%)	VAM (%)	VCB (%)	RBV (%)	Estabilidade (kgf)	Fluência (mm)	MR (MPa)	RT (MPa)	MR/RT	Deformação permanente (%)
			Aparente	Teórica										
Guimarães; Ribeiro (2005)	Mistura com ARC	6,5	2,193	N/A	8,5	N/A	N/A	62	1135	3,2	N/A	N/A	N/A	N/A
		7	2,215	N/A	6,9	N/A	N/A	68	1201	2,3	N/A	N/A	N/A	N/A
		7,5	2,228	N/A	5,7	N/A	N/A	73	1287	2,5	N/A	N/A	N/A	N/A
		8	2,251	N/A	4	N/A	N/A	80	1271	2,8	N/A	N/A	N/A	N/A
		8,5	2,245	N/A	3,6	N/A	N/A	83	1178	3,2	N/A	N/A	N/A	N/A
		9	2,246	N/A	2,1	N/A	N/A	89	743	5,8	N/A	N/A	N/A	N/A
Paranavithana; Mohajerani (2006)	Mistura de controle 80 golpes	5	2,607	2,506	3,9	14,4	N/A	73,1	N/A	N/A	739,4	N/A	N/A	N/A
		5,5	2,583	2,505	3	14,9	N/A	79,7	N/A	N/A	440,0	N/A	N/A	N/A
		6	2,556	2,503	2,1	15,4	N/A	86,5	N/A	N/A	580,7	N/A	N/A	N/A
	Mistura de controle 120 golpes	5	2,607	2,509	3,7	14,3	N/A	73,7	N/A	N/A	756,1	N/A	N/A	N/A
		5,5	2,583	2,512	2,8	14,6	N/A	81,2	N/A	N/A	665,2	N/A	N/A	N/A
		6	2,556	2,506	2	15,3	N/A	87,2	N/A	N/A	580,7	N/A	N/A	N/A
	Mistura com ARC 80 golpes	5,1	2,514	2,337	7,1	11,7	N/A	39,9	N/A	N/A	442,4	N/A	N/A	N/A
		5,5	2,482	2,362	4,8	11,1	N/A	56,5	N/A	N/A	339,3	N/A	N/A	N/A
		6	2,468	2,349	4,8	12,1	N/A	60,1	N/A	N/A	276,0	N/A	N/A	N/A
		6,5	2,434	2,345	3,7	12,7	N/A	71,2	N/A	N/A	339,5	N/A	N/A	N/A
	Mistura com ARC 120 golpes	5,1	2,514	2,36	6,5	11,5	N/A	40,3	N/A	N/A	444,5	N/A	N/A	N/A
		5,5	2,482	2,365	4,7	11	N/A	57,2	N/A	N/A	384,6	N/A	N/A	N/A
		6	2,468	2,351	4,7	12	N/A	60,5	N/A	N/A	352,6	N/A	N/A	N/A
		6,5	2,434	2,348	3,6	12,6	N/A	71,9	N/A	N/A	314,7	N/A	N/A	N/A
Ron et al. (2008)	Agregado reciclado	7,6	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	312,1	0,91	3428	N/A
	Agregado convencional	5,7	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	293,1	0,96	3151	N/A

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Continuação da Tabela 2.25 – Resultados de pesquisas anteriores (autora, 2013).

Pesquisador	Traços estudados	% de ligante na mistura	Densidade (g/cm³)		Vvazios (%)	VAM (%)	VCB (%)	RBV (%)	Estabilidade (kgf)	Fluência (mm)	MR (MPa)	RT (MPa)	MR/RT	Deformação permanente (%)
			Aparente	Teórica										
Silva (2009)	MI - Faixa C - CAP 50/70	9,5	1,936	2,100	7,8	24,3	16,5	67,9	1317	3,3	3864	0,63	6133	N/A
		10,0	1,954	2,090	6,5	24,0	17,5	72,9	1171	3,7	N/A	N/A	N/A	N/A
		10,5	1,965	2,080	5,5	23,9	18,4	76,9	1100	4,0	N/A	N/A	N/A	16,8
		11,0	1,967	2,070	5,0	24,1	19,2	79,4	917	4,4	N/A	N/A	N/A	N/A
		11,5	1,953	2,060	5,2	25,0	19,8	79,2	873	5,0	N/A	N/A	N/A	N/A
	MII - Faixa B - CAP 50/70	9,0	1,951	2,112	7,6	23,5	15,8	67,5	1566	3,0	3305	0,51	6480	N/A
		9,5	1,960	2,101	6,7	23,5	16,7	71,3	1260	3,3	N/A	N/A	N/A	N/A
		10,0	1,973	2,091	5,7	23,3	17,6	75,7	1049	3,7	N/A	N/A	N/A	21,7
		10,5	1,983	2,081	4,7	23,3	18,5	79,7	905	4,2	N/A	N/A	N/A	N/A
		11,0	1,982	2,072	4,3	23,6	19,3	81,7	878	5,4	N/A	N/A	N/A	N/A
	MIII - Faixa C - CAP 30/45	9,5	1,947	2,114	7,9	23,9	16,0	67,0	1409	2,5	6000	1,04	5769	N/A
		10,0	1,962	2,104	6,8	23,6	16,9	71,4	1282	2,8	N/A	N/A	N/A	N/A
		10,5	1,975	2,095	5,7	23,5	17,8	75,7	1195	3,0	N/A	N/A	N/A	9,9
		11,0	1,993	2,085	4,4	23,1	18,7	80,8	1120	3,3	N/A	N/A	N/A	N/A
		11,5	1,989	2,076	4,2	23,6	19,4	82,2	1195	3,9	N/A	N/A	N/A	N/A
	MIV - Faixa B - CAP 30/45	9,0	1,972	2,125	7,2	22,6	15,4	68,1	1274	2,5	7223	1,2	6019	N/A
		9,5	1,997	2,116	5,6	22,0	16,4	74,5	1252	2,9	N/A	N/A	N/A	N/A
		10,0	2,010	2,106	4,6	21,9	17,3	79,2	1230	3,2	N/A	N/A	N/A	13,6
		10,5	1,996	2,096	4,5	22,8	18,0	78,9	1005	3,7	N/A	N/A	N/A	N/A
		11,0	1,994	2,087	4,5	23,2	18,7	80,7	784	4,5	N/A	N/A	N/A	N/A
Wong et al. (2007)	Mistura referência	5,3	N/A	N/A	4,6	N/A	N/A	75,0	1200	4	N/A	N/A	N/A	N/A
	6% de substituição sem tratamento	5,3	N/A	N/A	4,5	N/A	N/A	72	1600	3,7	N/A	N/A	N/A	N/A
	45% de substituição sem tratamento	6,5	N/A	N/A	4,9	N/A	N/A	73	1700	2,6	N/A	N/A	N/A	N/A
	45% de substituição com tratamento	7	N/A	N/A	4,5	N/A	N/A	76	1550	2,5	N/A	N/A	N/A	N/A

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo são descritos a origem do ligante e de todos os agregados selecionados para utilização nesta pesquisa, apresentando os métodos de ensaios utilizados para a caracterização de tais materiais. São apresentados os ruídos do processo e os fatores variáveis, além de definidas as variáveis que seriam relevantes e adequadas para os objetivos propostos, de modo a delimitar o universo de estudo.

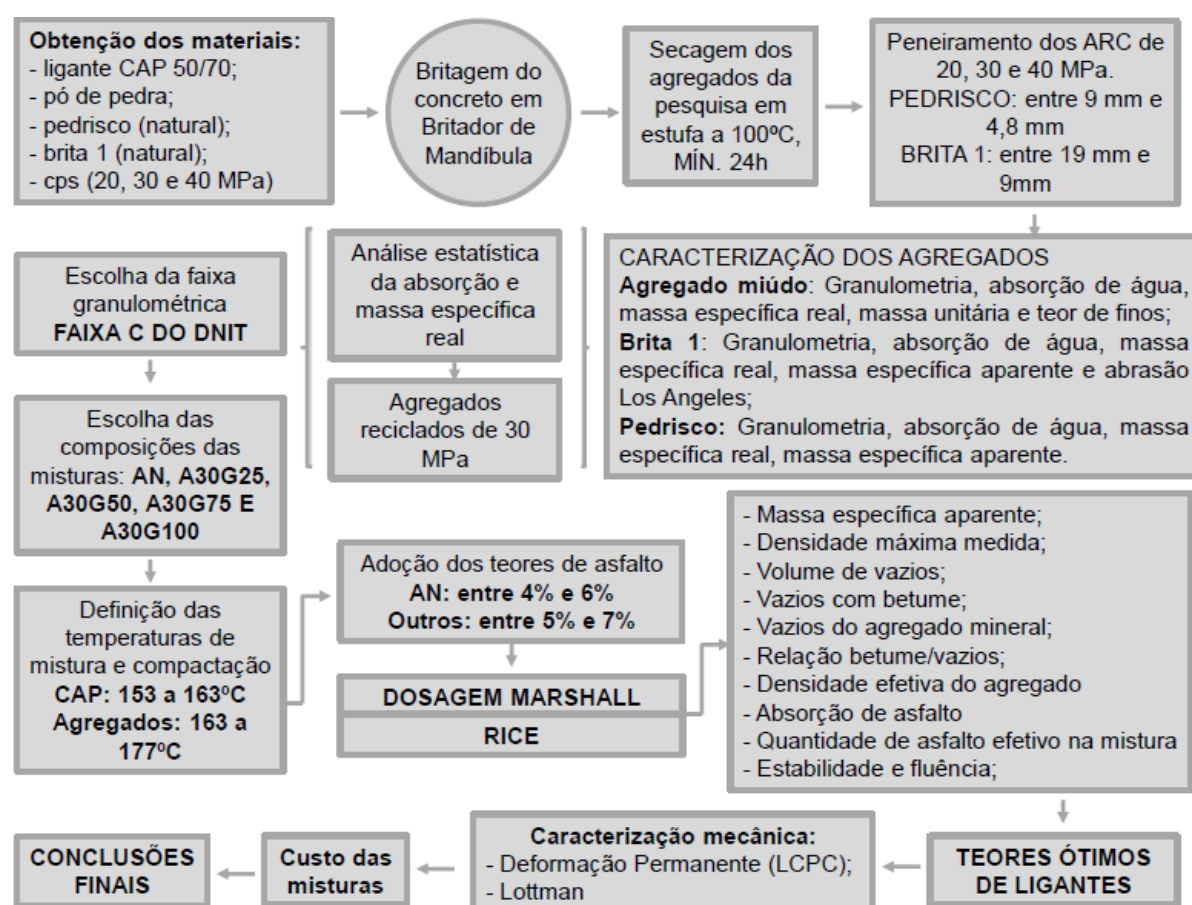


Figura 3.1 – Fluxograma do programa experimental utilizado nesta pesquisa.

É apresentada e definida uma única curva granulométrica para todas as misturas asfálticas estudadas. São sucintamente descritos os métodos de dosagem Marshall, o ensaio RICE para determinação densidade máxima medida, o ensaio de deformação permanente através da mesa compactadora e simulador de tráfego

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

LCPC e o ensaio de resistência da mistura asfáltica compactada ao dano por umidade induzida (ensaio Lottman).

Por último, é apresentada uma tabela com o alvo desejado para as propriedades mecânicas estudadas.

Nesta pesquisa foram estudadas as propriedades físico-mecânicas dos concretos betuminosos usinados a quente produzidos com agregado graúdo reciclado de concreto em substituição, em variados percentuais, ao agregado graúdo natural. Salienta-se que o agregado miúdo utilizado, conforme se observa na sequência deste capítulo, não foi substituído.

O Fluxograma apresentado na Figura 3.1 sintetiza o programa experimental utilizado nesta pesquisa.

Considerou-se que a demanda de qualidade do CBUQ produzido deve ser baseada no desempenho do concreto betuminoso usinado a quente, avaliados de acordo com os resultados dos ensaios mecânicos realizados, aliado ao máximo teor de agregado reciclado de concreto e ao menor custo para sua fabricação, de acordo com os graus de importância relacionados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Demanda de qualidade.

Demanda de Qualidade	Tipo	Grau de importância
Qualidade	Maior-é-melhor	2
Reaproveitamento de resíduos	Maior-é-melhor	2
Custo	Menor-é-melhor	1

3.1. Variáveis do projeto

- Concretos asfálticos produzidos com diferentes teores de substituição de agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado de concreto: 0, 25, 50, 75 e 100%;

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.2. Ruídos do processo

Os ruídos do processo estão vinculados principalmente aos procedimentos de moldagem de corpo de prova do concreto betuminoso usinado a quente, haja visto que, exceto para o ensaio de deformação permanente através da mesa compactadora e simulador de tráfego LCPC, os procedimentos de usinagem do CAP com os agregados da mistura ocorreram manualmente ao fogo direto, com ausência de controles de temperatura eficientes, o que pode, inclusive, ter causado variações de temperaturas e de velocidades de misturas de uma mistura para outra, fatos que podem influenciar nas propriedades do CAP e da mistura. Visando minimizar tais fatores, foi utilizada uma chapa cerâmica entre a chama e o recipiente de mistura do CAP com os agregados, conforme Figura 3.2, o que possibilitou uma melhor dispersão do calor na base de tal recipiente. No ensaio de deformação permanente através da mesa compactadora e simulador de tráfego LCPC a usinagem dos corpos de prova foi realizada em um misturador mecânico, a temperatura constante em torno de 170°C, com controle da velocidade e do tempo das misturas.



Figura 3.2 – Chapa cerâmica utilizada entre a chama e o recipiente de mistura do CAP.

Patriota *et al.* (2004) observou que podem ocorrer dispersões nas curvas de fadiga devido ao método de preparo dos corpos de prova, preparados de forma individual. Os pesquisadores complementam que uma forma de diminuir a dispersão verificada seria a mistura de uma quantidade maior de massa asfáltica de cada vez.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste trabalho não foi realizado o ensaio de vida de fadiga, porém, é possível que a situação observada por Patriota *et al.* (2004) possa ter influência nos ensaios realizados.

Porém, apesar de ser a ideal, essa proposição se mostra inviável na elaboração desta pesquisa, já que por dia de trabalho em laboratório verificou-se ser possível a moldagem de no máximo oito corpos de prova tipo Marshall e que, ao tentar usinar mais de um corpo de prova de uma única vez, verificou-se insucesso e ocorrência de perda de material, devido à dificuldade de mistura, em decorrência do peso total e do tempo de mistura necessário.

Dessa forma, cada corpo de prova foi usinado individualmente de forma manual, exceto para o ensaio de deformação permanente através da mesa compactadora e simulador de tráfego LCPC, no qual foi utilizado um misturador mecânico, viabilizando a usinagem dos dois corpos de prova analisados para cada traço de uma única vez.

Além disso, os corpos de prova de concretos utilizados para a produção de ARCg possuem a mesma origem, todos foram doados pela mesma concreteira, a SUPERMIX – inclusive foram todos executados com os mesmos agregados e tipo de cimento, alterando-se somente traço e fator água/cimento para a obtenção das três classes de resistência mecânica à compressão, iguais a 20, 30 e 40MPa.

Porém, sabe-se que foram confeccionados em épocas distintas, e um lapso temporal de semanas ou meses pode vir a causar alterações nas propriedades dos agregados de concreto reciclado gerados e, também, nas propriedades das misturas a serem analisadas, fato que não será possível considerar nesta pesquisa, devido à impossibilidade de mensuração.

3.3. Fatores controláveis

Os fatores controláveis são o teor de substituição do ARCg e os teores ótimos de ligante, tendo sido os teores ótimos de ligante definidos através do método de dosagem Marshall, de acordo com o método de ensaio DNER-ME 043:1995, e com a determinação da densidade máxima medida, através da execução do ensaio RICE, de acordo com a norma ABNT NBR 15619:2012, para todos os traços estudados.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Foi também determinada a faixa granulométrica para as misturas, buscando-se encaixar na faixa C do DNIT, apresentada na Tabela 2.20.

3.4. Descrição dos materiais

3.4.1. Seleção da amostra

Este trabalho selecionou as seguintes amostras:

- ARCg fabricado com concreto de 20 MPa – brita 1 e pedrisco;
- ARCg fabricado com concreto de 30 MPa – brita 1 e pedrisco;
- ARCg fabricado com concreto de 40 MPa – brita 1 e pedrisco;
- agregado graúdo natural – brita 1 e pedrisco;
- agregado miúdo artificial – pó de pedra; e
- CAP 50/70.

As amostras não apresentaram variações durante o projeto, já que todo o material a ser utilizado nos experimentos teve a mesma procedência.

3.4.2. Ligante

O ligante utilizado nessa pesquisa é o cimento asfáltico CAP 50/70, cuja amostra foi obtida em parceria junto com a empresa Megapav Construtora de Obras, sendo o mesmo oriundo da REPAR - Refinaria Presidente Getúlio Vargas da Petrobrás, localizada no município de Araucária-PR.

3.4.3. Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado é artificial, tipo pó de pedra, de natureza calcária. Antes de utilizado, todo o material foi seco em estufa a 100°C, por no mínimo 24 horas, no Laboratório de Pavimentação Professor Armando Martins Pereira (LAMP) da UFPR.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.4.4. Agregado graúdo

Nesta pesquisa foram utilizados agregado graúdo natural de rocha calcária e agregado graúdo reciclado de concreto com três resistências diferentes.

Foram doados pela concreteira SUPERMIX os corpos de prova de concreto, dentro das três classes de resistências desejadas, 20, 30 e 40 MPa,.

Os corpos de prova foram triturados em britador de mandíbula, vide Figura 3.3, para obtenção dos três grupos distintos de agregados reciclados de concreto, de acordo com a resistência do concreto de origem, chamados de A20, A30 e A40, respectivamente neste trabalho.



Figura 3.3 – Britadores de Mandíbula utilizados nesse trabalho.

Todos os agregados utilizados na pesquisa foram secos em estufa a 100°C por no mínimo 24 horas.

Após a secagem dos agregados reciclados foi realizado o peneiramento para dividir o material em frações visando o enquadramento do material na faixa C do DNIT, sendo que toda a fração passante na peneira nº 4, ou seja, todo o material com diâmetro menor que 4,8 mm foi desprezado. Ficou definida a fração brita 1 como a fração retida na peneira 9 mm e passante na 19 mm e a fração pedrisco como a fração retida na peneira 4,8 mm e passante na 9 mm.

Exceto a secagem dos agregados, que foi realizada no Laboratório de Pavimentação Professor Armando Martins Pereira (LAMP) da UFPR, todos os

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

procedimentos laboratoriais descritos neste item foram realizados no Instituto de Pesquisa para o Desenvolvimento (LACTEC).

3.5. Caracterização dos materiais

3.5.1. Ligante

Tabela 3.2 – Características convencionais do CAP 50/70 (Fonte: Laboratório Un-Repar/OT/QP – Araucária-PR).

Característica	Método (ASTM)	Especificação	Resultado	Unidade
Penetração	D5	50 a 70	63	0,1 mm
Ponto de Amolecimento	D36	46 mín.	46,7	°C
Viscosidade Saybolt Furol a 135°C	E102	141 mín.	216	s
Viscosidade Brookfield a 135°C-SP21 20RPM	D4402	274 mín.	420	cp
Viscosidade SSF 150°C	E 102	50 mín.	105,1	s
Viscosidade Brookfield a 150°C-SP21	D4402	112 mín.	200	cp
Viscosidade Saybolt Furol a 177°C	E 102	30 a 150	38,9	s
Viscosidade Brookfield a 177°C-SP21	D4402	57 a 285	72	cp
RTFOT Penetração Retida	D5	55 mín.	60	%
RTFOT Aumento do Ponto de Amolecimento	D36	8 máx.	6,1	°C
RTFOT Ductilidade a 25°C	D113	20 mín.	>100	cm
RTFOT Variação em % Massa	D2872	-0,50 a 0,50	-0,317	%
Ductilidade a 25°C	D113	60 mín.	>100	cm
Solubilidade no Tricloroetileno	D2042	99,5 mín.	99,9	% massa
Ponto de Fulgor	D92	235 mín.	302	°C
Índice de Suscetibilidade Térmica	X018	-1,5 a 0,7	-1,5	N/A
Densidade relativa a 20/4 GC	D70	(1)	1,013	N/A
Aquecimento a 177 °C	X215	NESP (2)	NESP	N/A

(1) Ensaio não faz parte da especificação, utilizado para fins de faturamento comercial

(2) NESP = Não espuma

O ligante utilizado nessa pesquisa foi caracterizado de acordo com a nova especificação brasileira da Agência Nacional do Petróleo (ANP, 2005) e suas propriedades convencionais, fornecidas pela REPAR - Refinaria Presidente Getúlio Vargas da Petrobrás, concomitantes com tais especificações, estão apresentadas na Tabela 3.2.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Tendo como base as características do ligante, foram elaboradas interpolações que permitiram obter curva de viscosidade por temperatura e a equação que originou a curva, conforme Figura 3.4 e Equação 3.1.

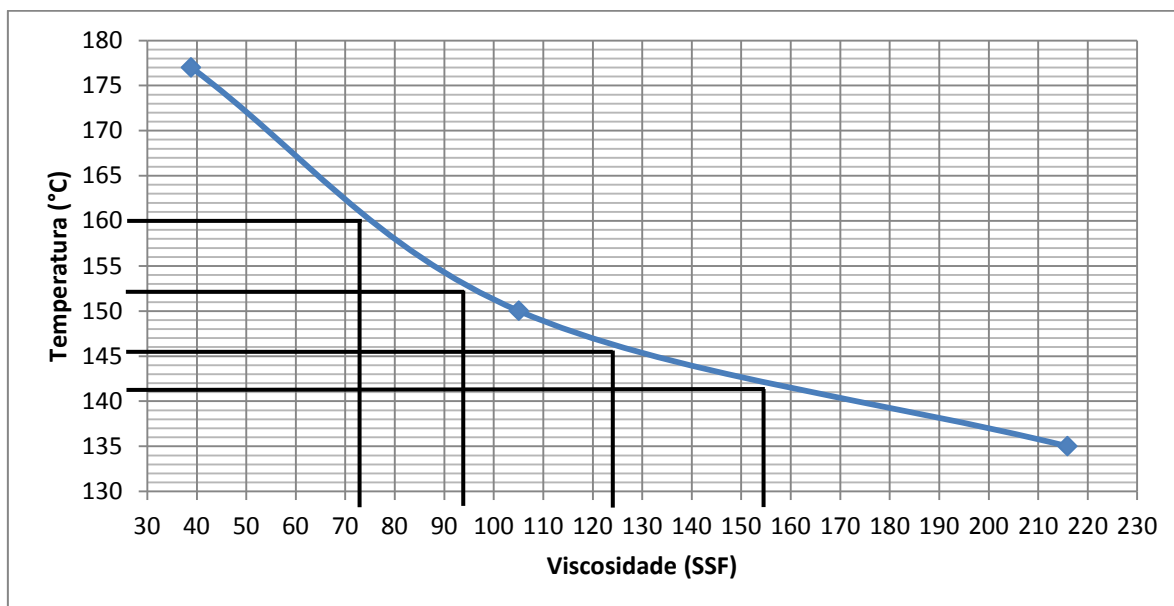


Figura 3.4 – Curva de viscosidade por temperatura.

Equação 3.1 – Equação da curva de viscosidade por temperatura.

$$a = 0,0752b^2 - 25,82b + 2285,9$$

Onde:

a = Viscosidade (SSF)

b = Temperatura (°C)

Donde se chegou às seguintes temperaturas de mistura e compactação:

- 153 a 163°C para o aquecimento do ligante (CAP 50/70);
- 163 a 177°C para o aquecimento dos agregados; e
- 140 a 145°C para a moldagem dos corpos de prova.

A temperatura utilizada para a moldagem dos corpos de prova tipo Marshall está apresentada na Figura 3.5 e na Figura 3.6 está apresentada a temperatura

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

utilizada para a moldagem dos corpos de prova para o ensaio de deformação permanente através da mesa compactadora e simulador de tráfego LCPC.



Figura 3.5 – Temperatura de moldagem igual à 140°C (moldagem dos corpos de prova tipo Marshall).



Figura 3.6 – Temperatura de moldagem igual à 140°C (moldagem dos corpos de prova para o ensaio de deformação permanente – simulador de tráfego francês LCPC).

3.5.2. Agregado miúdo

A caracterização do agregado miúdo utilizado neste trabalho foi feita no Laboratório de Pavimentação Professor Armando Martins Pereira (LAMP) da UFPR.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

As propriedades, normas e resultados obtidos estão relacionados na Tabela 3.3 e Figura 3.7.

Tabela 3.3 – Propriedades, normas e resultados do agregado miúdo.

Propriedade/ Característica	Norma	Resultado	Unidade
Análise granulométrica	ABNT NBR NM 248:2003	Vide Figura 3.7	N/A
Absorção de água	ABNT NBR NM 30:2001	1,1	%
Massa específica aparente	ABNT NBR NM 52:2009	2,562	g/cm ³
Massa específica real	ABNT NBR NM 52:2009	2,635	g/cm ³
Teor de finos < 75 µm	ABNT NBR NM 46:2003	4,0	%

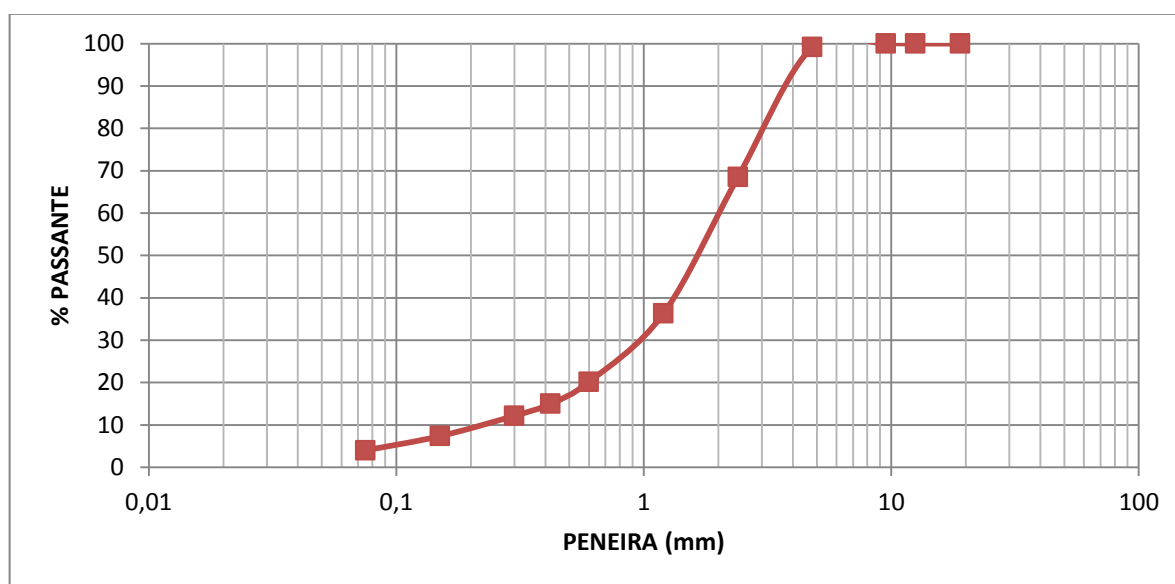


Figura 3.7 – Curva granulométrica do agregado miúdo – Pó de pedra.

3.5.3. Agregado graúdo

A caracterização dos agregados graúdos, tanto naturais quanto reciclados, utilizados neste trabalho foi feita no Laboratório de Pavimentação Professor Armando Martins Pereira (LAMP) da UFPR. As propriedades, normas e resultados obtidos estão relacionados na Tabela 3.4, Tabela 3.5, Figura 3.8 e Figura 3.9.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Tabela 3.4 – Propriedades, normas e resultados dos agregados graúdos naturais e reciclados tipo Brita 1.

Propriedade	Análise granulométrica	Absorção de água	Massa específica real	Massa específica aparente	Abrasão Los Angeles
Norma	ABNT NBR NM 248:2003	ABNT NBR NM 53:2009	ABNT NBR NM 53:2009	ABNT NBR NM 53:2009	ABNT NBR NM 51:2001
Unidade	N/A	%	g/cm ³	g/cm ³	%
Agr. natural	Vide Figura 3.8	0,5	2,756	2,720	16
20 MPa	(2)	5,2 (1)	2,691 (1)	2,388	32
30 MPa	(2)	5,1 (1)	2,698 (1)	2,419	27
40 MPa	(2)	5,3 (1)	2,744 (1)	2,387	25

(1) Média dos valores obtidos antes das repetições desses ensaios.

(2) Para os agregados reciclados não foi realizado o ensaio de granulometria, uma vez que a granulometria dos mesmos ficou definida no peneiramento realizado após a secagem do material, sendo o mesmo passante na peneira 19mm e retido na peneira 9mm.

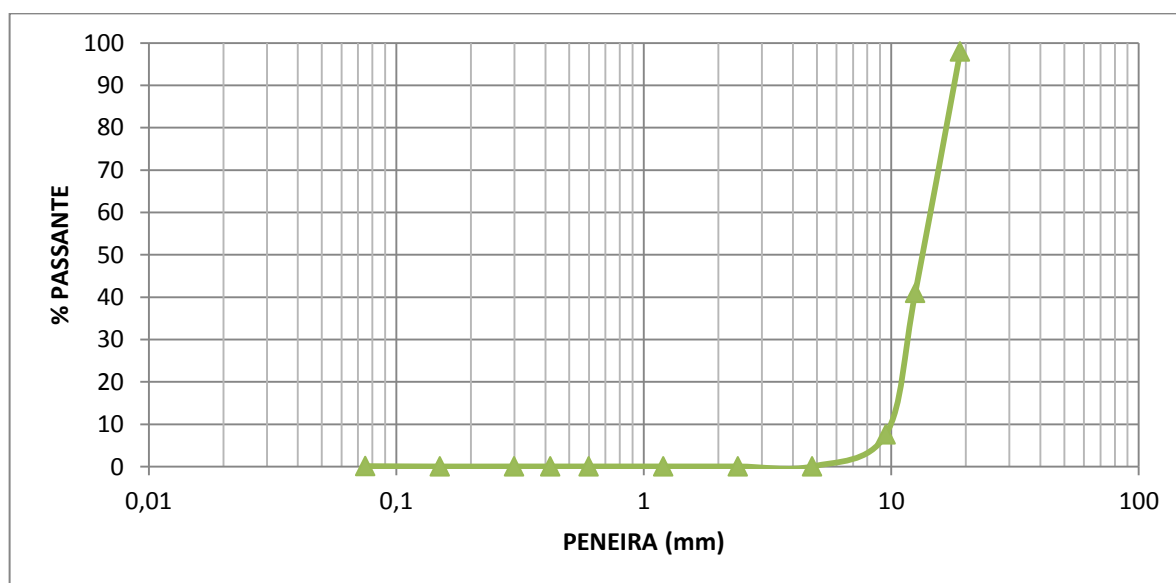


Figura 3.8 – Curva granulométrica do agregado graúdo natural – Brita 1.

Inicialmente, pretendia-se analisar as propriedades físico-mecânicas de treze misturas, originadas de quatro teores de substituição de agregado natural por reciclado para as três diferentes classes de resistência de agregados graúdos reciclados de concreto (A20, A30 e A40), além da mistura de referência, AN. Porém, após repetições dos ensaios de massa específica real e absorção para o pedrisco e para a brita 1 das três classes de agregados reciclados, A20, A30 e A40, conforme a norma ABNT NBR NM 53:2003, cujos resultados estão apresentados na Tabela 3.6

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

e Tabela 3.7, verificou-se que não houve tanta variação dessas propriedades quanto se imaginava variando-se as classes de resistência dos concretos originários dos ARCg.

Tabela 3.5 – Propriedades, normas e resultados dos agregados graúdos naturais e reciclados tipo Pedrisco.

Propriedade/ Característica	Análise granulométrica	Absorção de água	Massa específica real	Massa específica aparente
Norma	ABNT NBR NM 248:2003	ABNT NBR NM 53:2009	ABNT NBR NM 53:2009	ABNT NBR NM 53:2009
Unidade	N/A	%	g/cm ³	g/cm ³
Agregado Natural	Vide Figura 3.9	0,8	2,684	2,629
20 MPa	(2)	8,9 (1)	2,651 (1)	2,142
30 MPa	(2)	9,0 (1)	2,620 (1)	2,119
40 MPa	(2)	8,3 (1)	2,673 (1)	2,188

(1) Média dos valores obtidos antes das repetições desses ensaios.

(2) Para os agregados reciclados não foi realizado o ensaio de granulometria, uma vez que a granulometria dos mesmos ficou definida no peneiramento realizado após a secagem do material, sendo o mesmo passante na peneira 19mm e retido na peneira 9mm.

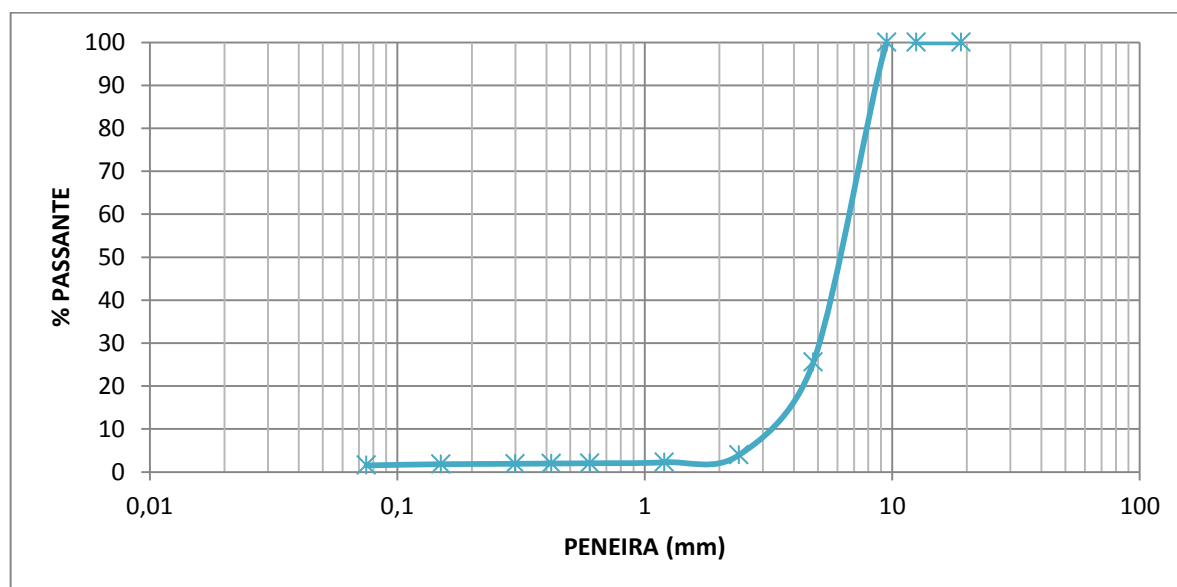


Figura 3.9 – Curva granulométrica do agregado graúdo natural – Pedrisco.

Por este motivo, para analisar esses dados, foram realizadas análises estatísticas, através dos métodos de análise de variância, utilizando para tal a tabela

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

ANOVA e a comparação múltipla de médias, onde foi considerado o limite de decisão igual a três vezes o desvio padrão das médias e utilizado o modelo estatístico de análise fatorial. Conforme se observa, os cálculos da análise estatística são apresentados em anexo, no item 7.1. A Tabela 3.8 apresenta o resumo das propriedades de absorção e massa específica real para os agregados reciclados de concreto, após análise estatística.

Tabela 3.6 – Absorção e massa específica real para os agregados reciclados de concreto – Brita 1.

BRITA 1					
Massa específica real (g/cm ³)			Absorção (%)		
A20	A30	A40	A20	A30	A40
2,701	2,704	2,749	4,96	5,26	5,24
2,682	2,692	2,740	5,44	4,87	5,31
2,681	2,710	2,715	4,05	3,71	5,24
2,523	2,707	2,714	4,20	3,65	5,17
2,689	2,714	2,710	4,14	3,88	5,83

Tabela 3.7 – Absorção e massa específica real para os agregados reciclados de concreto – Pedrisco.

PEDRISCO					
Massa específica real (g/cm ³)			Absorção (%)		
A20	A30	A40	A20	A30	A40
2,685	2,613	2,714	9,04	9,03	8,12
2,616	2,628	2,632	8,86	9,02	8,48
2,698	2,680	2,701	8,30	9,78	9,22
2,661	2,677	2,707	7,59	8,69	8,01
2,669	2,667	2,695	7,80	9,14	9,29

Verifica-se resultados de diferença significativa entre as médias, quando da comparação múltipla de médias para as propriedades de absorção e massa específica real da brita 1 e absorção do pedrisco. Acontece, porém, que os valores

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

que acusaram diferença significativa entre as médias incorrem em diferenças avaliadas, de fato, como não significativas.

Desta forma, os resultados obtidos indicam que as propriedades de absorção e massa específica real, tanto para brita 1 quanto para pedrisco, não possuem diferenças estatísticas entre as classes dos agregados estudados, A20, A30 e A40.

Tabela 3.8 – Resumo das propriedades de absorção e massa específica real para os agregados reciclados de concreto.

FRAÇÃO	PROPRIEDADE	RESISTÊNCIAS		
		A20	A30	A40
BRITA 1	MASSA ESPECÍFICA REAL (g/cm ³)	2,688	2,706	2,726
	ABSORÇÃO (%)	4,56	4,27	5,36
PEDRISCO	MASSA ESPECÍFICA REAL (g/cm ³)	2,666	2,653	2,690
	ABSORÇÃO (%)	8,32	9,13	8,62

Considerando que essas seriam as propriedades dos ARCg que mais influenciariam nas propriedades do agregado e conseqüentemente do CAP, foram descartados, portanto, os agregados tipo A20 e A40 desta pesquisa, continuando, assim, a partir deste ponto, o estudo apenas dos agregados tipo A30. A Tabela 3.9 apresenta todas as misturas, indicando a proporção de agregado natural e agregado reciclado de concreto, utilizadas para o andamento desta pesquisa.

Tabela 3.9 – Proporções dos agregados.

Classe de Resistência	Teor de agregado graúdo		Nomenclatura utilizada
	Agregado natural	Agregado reciclado	
30 MPa			
30 MPa	75%	25%	A30G25
30 MPa	50%	50%	A30G50
30 MPa	25%	75%	A30G75
30 MPa	0%	100%	A30G100
Mistura de referência			
-	100%	0%	AN

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.6. Definição da composição granulométrica teórica das misturas asfálticas

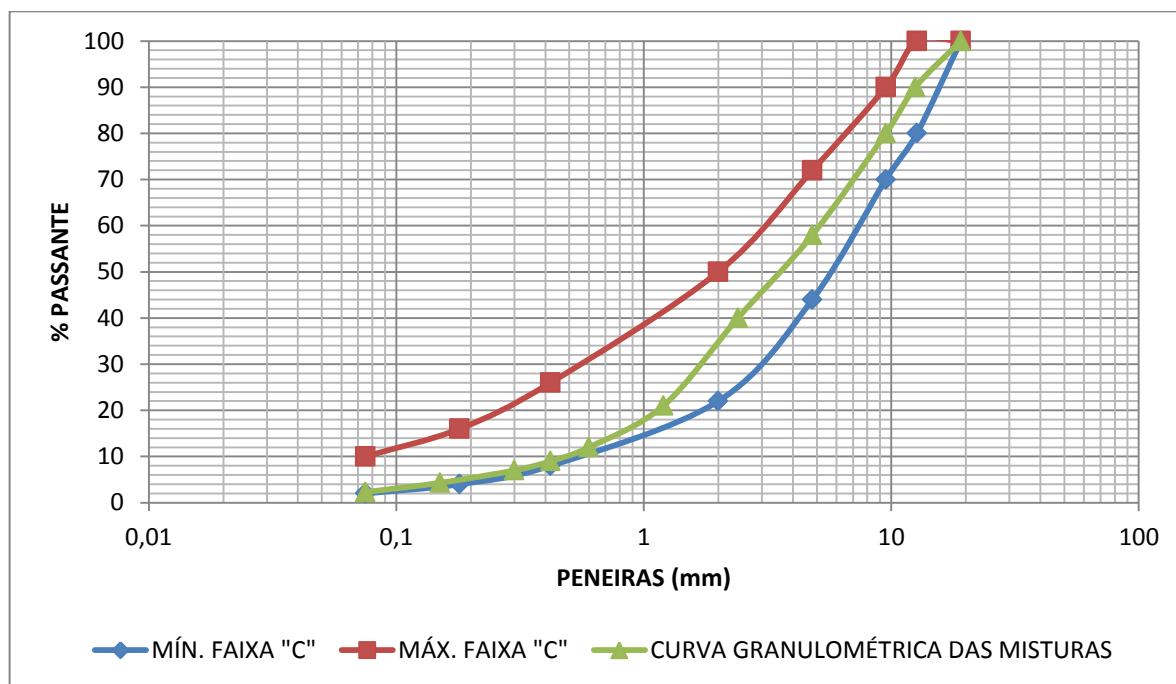


Figura 3.10 – Curva granulométrica das misturas.

Tabela 3.10 – Composição granulométrica das misturas.

Peneira	Abertura (mm)	Retido (%)	Passante (%)
3/4"	19,1	0	100
1/2"	12,7	10	90
3/8"	9,5	10	80
Nº 4	4,8	22	58
Nº 8	2,4	22	36
Nº 16	1,2	10	26
Nº 30	0,60	9	17
Nº 50	0,30	4	13
Nº 100	0,15	3	10
Nº 200	0,075	4	6
fundo	< 0,075	6	

De posse da curva granulométrica e granulometria de todos os elementos constituintes das misturas asfálticas, foi escolhida uma única composição dos

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

agregados para todas as misturas, de forma a se enquadrar na granulometria da faixa C do DNIT, apresentada na Tabela 2.20, conforme Tabela 3.10 e Figura 3.10.

As composições em percentual de cada fração de agregados nas misturas são apresentadas na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 – Composição dos agregados nas misturas.

Material	AN	A30G25 - 25% de substituição	A30G50 - 50% de substituição	A30G75 - 75% de substituição	A30G100 - 100% substituição
AN - Brita 1	20%	15%	10%	5%	0%
A30 - Brita 1	0%	5%	10%	15%	20%
AN - Pedrisco	22%	16,5%	11%	5,5%	0%
A30 - Pedrisco	0%	5,5%	11%	16,5%	22%
Pó de pedra	58%	58%	58%	58%	58%
TOTAL	100%	100%	100%	100%	100%

Todos os agregados utilizados nesta pesquisa foram devidamente homogeneizados e o tamanho da amostra reduzida com o uso do redutor de amostras tipo Jones, conforme Figura 3.11, no Laboratório de Pavimentação Professor Armando Martins Pereira (LAMP) da UFPR, para a preparação das misturas asfálticas.



Figura 3.11 – Redutor de amostras tipo Jones.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.7. Determinação dos teores ótimos de ligante

Para esse trabalho foi utilizado o método de dosagem Marshall por ser mais utilizado para determinação de teores ótimos neste país, conforme se observou no capítulo dois dessa dissertação.

Todos os procedimentos laboratoriais apresentados neste item, visando a determinação dos teores ótimos de ligante das misturas asfálticas estudadas, foram realizados no Laboratório de Pavimentação Professor Armando Martins Pereira (LAMP) da UFPR.

3.7.1. Método de dosagem Marshall (DNER-ME 043:1995)

Após a etapa de seleção e caracterização dos materiais a serem utilizados, o projeto de uma mistura de concreto asfáltico consiste em determinar o traço da mistura, ou seja, a porcentagem dos diversos agregados minerais utilizados e a porcentagem de ligante asfáltico, de maneira a satisfazer os requisitos mínimos de estabilidade e durabilidade da mistura asfáltica determinados pelas especificações (CERATTI; REIS, 2011).

Na dosagem das misturas asfálticas pelo método Marshall são considerados os seguintes parâmetros:

- granulometria: deve ser dosada de tal forma que fique próxima a máxima densidade para garantir a melhor estabilidade da mistura;
- densidade aparente da mistura considerando-se os vazios com ar;
- densidade máxima teórica da mistura: supondo-se a densidade da mistura sem os vazios;
- volume de vazios da mistura ($V_v\%$): é o volume de ar existente numa mistura compactada, em relação ao volume total. Deve variar de 3% a 5% em camadas de rolamento e de 4% a 6% para camadas de ligação (binder), que é a camada subjacente a de rolamento. Este volume de vazios assegura que não ocorrerá afluência do ligante à superfície da mistura, devido à expansão decorrente do aumento da temperatura em serviço. Um elevado volume de vazios poderá

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

ocasionar um rápido endurecimento e oxidação do ligante e consequente deterioração prematura da mistura exposta às condições ambientais de uso, causando a desintegração do revestimento asfáltico;

- vazios do agregado mineral (VAM%): vazios intergranulares da mistura compactada, incluindo o volume de ar e de asfalto, em relação ao volume total. Variam de acordo com o tamanho máximo nominal (TMN) do agregado utilizado na mistura, pela especificação de serviço DNIT-ES 031:2006, variam de 13% a 18%. Quanto maior o TMN, menor o VAM% (mínimo);

- relação betume/vazios (RBV%): percentagem de vazios intergranulares do agregado mineral preenchidos com cimento asfáltico e serve para garantir que os vazios do agregado mineral sejam preenchidos por uma quantidade razoável deste ligante. Valores de RBV muito baixos podem comprometer a durabilidade das misturas e, do contrário, quando muito elevados afetam a estabilidade. Varia de 75% a 82% para camadas de rolamento e de 65% a 72% para camadas de ligação (binder);

- estabilidade (E): carga sob a qual o corpo de prova é rompido quando submetido a uma compressão radial semiconfinada. A estabilidade mínima exigida pelo método de ensaio DNER-ME 043:1995, para 75 golpes é 500 kgf;

- fluência (F): deformação total sofrida pelo corpo de prova ao romper-se na compressão semiconfinada.

Os requisitos de dosagem de concreto asfáltico de acordo com a especificação de serviço DNIT-ES 031:2006 são apresentadas na Tabela 3.12.

Outro parâmetro a ser verificado é o VAM. Como nesse trabalho a dimensão máxima do agregado utilizado é de 19mm, o VAM deve ser no mínimo igual a 15%, conforme determina os requisitos de dosagem da DNIT-ES 031:2006.

Para a preparação das misturas, as amostras de todos os materiais foram previamente pesadas e preparadas, conforme recomendações da DNIT-ES 031:2006 e do DNER-ME 043:1995.

Neste trabalho foi utilizado o compactador automático para a dosagem Marshall e definição dos teores ótimos de ligante.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

São apresentados os equipamentos utilizados, bem como procedimentos seguidos, para a realização deste ensaio na Figura 3.12, Figura 3.13, Figura 3.14, Figura 3.15, Figura 3.16 e Figura 3.17.

Tabela 3.12 – Requisitos de dosagem de concreto asfáltico (DNIT-ES 031:2006).

Características	Unid.	Método de Ensaio	Camada de Rolamento	Camada de Ligação
VV	%	DNER – ME 043:1995	3 – 5	4 – 6
RBV	%	DNER – ME 043:1995	75 – 82	65 – 72
Estabilidade mín. (75 golpes)	kgf	DNER – ME 043:1995	500	500
RT a 25 °C, mín.	MPa	DNER – ME 138:1994	0,65	0,65



Figura 3.12 – Adição de ligante aos agregados.



Figura 3.13 – Mistura ao fogo, com a utilização da chapa cerâmica.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL



Figura 3.14 – Colocação de 1,2 kg da mistura no molde para compactação.



Figura 3.15 – Compactador mecânico utilizado nesta pesquisa.



Figura 3.16 – Banho Maria dos corpos de prova a 60°C.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL



Figura 3.17 – Determinação da estabilidade e fluência.

3.7.2. Densidade máxima medida, ensaio RICE (ABNT NBR 15619:2012)

O método de dosagem Marshall considera apenas a densidade máxima teórica da mistura, que é calculada através da ponderação das densidades reais dos materiais constituintes da mistura, através do método de Fuller-Talbot. Na metodologia Superpave, é comum a obtenção da densidade máxima medida, através do ensaio RICE, que implica na aplicação de uma bomba de vácuo. No Brasil, a norma que especifica esse ensaio é a ABNT NBR 15619:2012.



Figura 3.18 – Equipamento para determinação da densidade máxima medida utilizado nesta pesquisa.

As vantagens de se usar a densidade máxima medida são:

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

- não precisar determinar as densidades reais individuais dos agregados;
- descontar os poros preenchidos com ligante e não a absorção total medida com água, que é muito menos viscosa que o ligante.

É apresentado o equipamento utilizado para a realização deste ensaio na Figura 3.18.

3.7.3. Determinação dos parâmetros gerados na dosagem Marshall

Ceratti e Reis (2011) explicam o passo a passo do procedimento de determinação dos parâmetros gerados numa dosagem Marshall para concreto asfáltico:

- 1) adoção de teores de asfalto para os diferentes grupos de corpos de prova a serem moldados. Cada grupo deve ter no mínimo três corpos de prova;
- 2) após o resfriamento e a desmoldagem dos corpos de prova, obtém-se as dimensões do mesmo (diâmetro e altura). Determina-se para cada corpo de prova sua massa seca (MS) e submersa em água (MSsub);
- 3) a partir do teor de asfalto do grupo de corpos de prova em questão (%a), ajusta-se o percentual em massa de cada agregado.
- 4) com base nos percentuais em massa de cada agregado (%n), no teor de asfalto (%a) e nas massas específicas reais dos constituintes (Gi), calcula-se a densidade máxima teórica (DMT) correspondente ao teor de asfalto considerado, conforme Equação 3.2.

Equação 3.2 – Densidade máxima teórica (DMT) em g/cm³.

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%a}{G_a} + \frac{\%Ag}{G_{Ag}} + \frac{\%Ap}{G_{Ap}} + \frac{\%Am}{G_{Am}}}$$

Onde:

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

% a = porcentagem de asfalto, expressa em relação à massa total da mistura asfáltica;

% Ag, % Ap e %Am = porcentagem do agregado graúdo, pedrisco e agregado miúdo, respectivamente, expressas em relação à massa total da mistura asfáltica; e

Ga, Gag, Gap e Gam = massas específicas reais do asfalto, agregado graúdo, pedrisco e agregado miúdo (g/cm³).

- 5) a Densidade Máxima Medida (DMM), executada através do ensaio RICE, determinada conforme Equação 3.3 recomendada por Verdes (2010).

Equação 3.3 – Densidade máxima medida (DMM) em g/cm³.

$$DMM = \frac{A}{A + B - C} \times \rho_{\text{água}}$$

Onde:

A = massa da amostra seca em ar (g);

B = massa do recipiente com volume completo de água (g);

C = massa do recipiente + massa da amostra submersa em água (g);

$\rho_{\text{água}}$ = densidade de água na temperatura ambiente (à 25° C é igual a 0,9971), em g/cm³.

- 6) cálculo dos parâmetros de dosagem para cada corpo de prova, conforme Equação 3.4, Equação 3.5, Equação 3.6, Equação 3.7, Equação 3.8, Equação 3.9, Equação 3.10, Equação 3.11 e Equação 3.12, sendo as três últimas são recomendadas por Gouveia e Fernandes Júnior (2005).

Equação 3.4 – Volume dos corpos de prova (V) em cm³.

$$V = M_s - M_{s_{\text{sub}}}$$

Onde:

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

M_s = massa seca (g); e

M_{sub} = massa submersa em água (g).

Equação 3.5 – Massa específica aparente da mistura (G_{mb}) em g/cm³.

$$G_{mb} = \frac{M_s}{V}$$

Onde:

M_s = massa seca (g); e

V = volume dos corpos de prova (cm³).

Equação 3.6 – Volume de vazios (V_v) em %.

$$V_v = \frac{DMM - G_{mb}}{DMM}$$

Onde:

DMM = densidade máxima medida (g/cm³); e

G_{mb} = massa específica aparente da mistura (g/cm³);

Equação 3.7 – Vazios com betume (VCB) em %.

$$VCB = \frac{G_{mb} \times \% a}{G_a}$$

Onde:

G_{mb} = massa específica aparente da mistura (g/cm³);

$\% a$ = porcentagem de asfalto, expressa em relação à massa total da mistura asfáltica; e

G_a = massa específica real do asfalto (g/cm³).

Equação 3.8 – Vazios do agregado mineral (VAM) em %.

$$VAM = V_v + VCB$$

Onde:

V_v = volume de vazios (%); e

VCB = vazios com betume (%).

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Equação 3.9 – Relação betume/vazios (RBV) em %.

$$RBV = \frac{VCB}{VAM}$$

Onde:

VCB = vazios com betume (%); e

VAM = vazios do agregado mineral (%).

Equação 3.10 – Densidade efetiva do agregado (ρ_{ef}) em g/cm³.

$$\rho_{ef} = \frac{1 - \%a}{\frac{1}{DMM} - \frac{\%a}{G_a}}$$

Onde:

% a = porcentagem de asfalto, expressa em relação à massa total da mistura asfáltica;

DMM = densidade máxima medida (g/cm³); e

G_a = massa específica real do asfalto (g/cm³).

Equação 3.11 – Absorção de asfalto (A_{abs}) em %.

$$A_{abs} = \left(\frac{\rho_{ef} - \rho_{ap}}{\rho_{ap} \times \rho_{ef}} \right) \times \%a$$

Onde:

ρ_{ef} = Densidade efetiva do agregado (g/cm³);

ρ_{ap} = Densidade aparente do agregado (g/cm³); e

% a = porcentagem de asfalto, expressa em relação à massa total da mistura asfáltica.

Equação 3.12 – Quantidade de asfalto efetivo na mistura (A_{ef}) em %.

$$A_{ef} = \%a - A_{abs}$$

Onde:

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

% a = porcentagem de asfalto, expressa em relação à massa total da mistura asfáltica; e

Aabs = absorção de asfalto (%).

- 7) após as medidas volumétricas, os corpos de prova são submersos em banho-maria a 60°C por 30 a 40 minutos. Retira-se cada corpo de prova colocando-o imediatamente dentro do molde de compressão. Determinam-se por meio da prensa Marshall os seguintes parâmetros mecânicos:
 - a. estabilidade (N): carga máxima a qual o corpo de prova resiste antes da ruptura, definida como um deslocamento ou quebra de agregado de modo a causar diminuição na carga necessária para manter o prato da prensa se deslocando a uma taxa constante (0,8mm/segundo);
 - b. fluência (mm): deslocamento máximo apresentado pelo corpo de prova correspondente à aplicação da carga máxima.
- 8) com todos os valores dos parâmetros volumétricos e mecânicos determinados, foram plotadas curvas em função do teor de asfalto, que auxiliaram a definição do teor de projeto.

3.7.4. Escolha dos teores de ligante para a dosagem Marshall e ensaio RICE

Os teores de ligante escolhidos para a dosagem Marshall e ensaio RICE foram:

- 4%, 4,5%, 5%, 5,5% e 6% para traço AN;
- 5%, 5,5%, 6%, 6,5% e 7% para os demais traços.

Tendo sido escolhidos de acordo com experiência do orientador, que considerou que os agregados reciclados consomem mais CAP que os agregados naturais.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.7.5. Métodos para determinação do teor ótimo de ligante

Lima (2003) explica que de acordo com o método do Asphalt Institute (MS-2 e MS-20) existem duas maneiras de se escolher o teor ótimo de ligante:

1. A primeira baseada somente no volume de vazios (Vv). O teor ótimo é escolhido aquele referido as médias das especificações ou ao valor igual a 4%;
2. A segunda baseada na estabilidade Marshall, peso específico e volume de vazios (Vv). O teor ótimo escolhido é uma média dos três teores, correspondente aos teores de máxima estabilidade, máximo peso específico da amostra compactada e a um volume de vazios igual a 4% ou a média das especificações;

Um terceiro método, também utilizado, baseia-se num valor escolhido a partir dos teores obtidos para atender aos limites de volume de vazios (3% a 5%) e Relação Betume-Vazios (RBV) (75% a 82%). Este terceiro método é o adotado pela 3ª Unidade de Infraestrutura Terrestre do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), no Ceará (ALDIGUERI *et al.*, 2004).

Os três métodos apresentados nesse capítulo foram utilizados para determinar o teor ótimo de ligante das misturas estudadas.

3.8. Caracterização mecânica do CBUQ

A avaliação da utilização de materiais diversos no CBUQ é sempre realizada através da verificação da viabilidade econômica, técnica e operacional na pavimentação e o parâmetro para a avaliação é o desempenho mecânico.

A caracterização mecânica do CBUQ neste trabalho foi realizada através do ensaio de deformação permanente na mesa compactadora e simulador tipo LCPC, realizado no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação do Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da USP, e do ensaio Lottman, para verificar a resistência da mistura asfáltica compactada ao dano por umidade, realizado na Engefoto.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.8.1. Deformação permanente – Simulador de tráfego francês LCPC (NF-P-98-250-2:1997 e NF-P-98-253-1:1993)

O objetivo deste ensaio é simular a passagem de roda de um veículo no pavimento e é de fundamental importância.

A deformação permanente de uma mistura asfáltica submetida a repetições de cargas é ocasionada pela diminuição de volume de vazios, fluência do material e deformações por cisalhamento (COELHO, 1994 *apud* LIMA, 2003).

Motta (1991) esclarece que o uso de agregados ásperos e angulosos nas misturas asfálticas melhora o comportamento às deformações permanentes dos pavimentos.

No conjunto de equipamentos franceses do Laboratoire Central des Ponts Chaussées (LCPC), a mistura asfáltica é primeiramente compactada através de amassamento por roda de pneu com cargas e pressão de inflação reguláveis, na temperatura de projeto, realizada por equipamento denominado mesa compactadora. A compactação segue a especificação francesa NF-P-98-250-2:1997 (AFNOR, 1997) e produz uma placa compactada de mistura asfáltica nas dimensões padrão de 500 mm de comprimento e 180mm de largura, havendo placas com 50 e com 100 mm de espessura (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Para esse trabalho as placas ensaiadas possuíam 50 mm de espessura.

O ensaio de deformação permanente através da mesa compactadora e simulador de tráfego LCPC segue a especificação francesa NF-P-98-253-1:1993 (AFNOR, 1993) e é feito em um equipamento munido de roda pneumática, cuja pressão do pneu e carga no eixo são controláveis, assim como a temperatura também é regulável, empregando-se em geral 60°C para acelerar o processo. O ensaio é realizado em duas placas simultaneamente, colocadas uma em cada lado do equipamento, munido de um eixo com dois pneumáticos. O pneumático fica permanentemente em contato com a placa asfáltica e aplica carregamento em movimento longitudinal de ida e vinda, em ciclos de 1Hz. Mede-se o afundamento na trilha de roda em diversos pontos, conforme indicado na Figura 3.19, a cada determinado número de solicitações. Frequentemente são usados 1.000, 3.000, 10.000, 20.000 e 30.000 ciclos (BERNUCCI *et al.*, 2006).

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

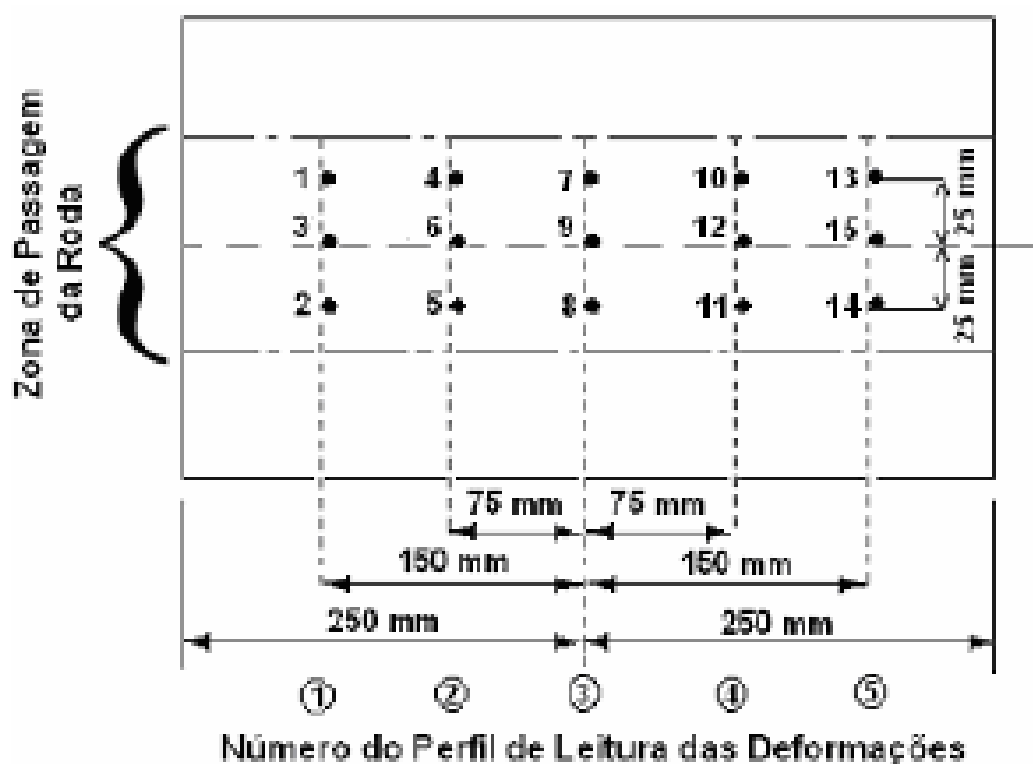


Figura 3.19 – Detalhe da faixa de transição da carga solicitante do simulador sobre a placa e os respectivos pontos de leitura das deformações (BARRA, 2005 apud SILVA, 2009).

O resultado do ensaio é dado em termos de afundamento em milímetros ou como um percentual da altura da placa original (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Os percentuais correspondentes aos afundamentos nas trilhas de roda são calculados a partir da expressão Equação 3.13.

Equação 3.13 – Afundamento na trilha de rodas a N ciclos (Atr_N) em %.

$$Atr_N = \frac{Média(L_N - L_{ii})}{H}, \text{ onde:}$$

L_N = Leituras após N ciclos de carregamento;

L_i = Leituras iniciais;

H = altura inicial da placa

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

São apresentados os equipamentos utilizados, bem como procedimentos seguidos, para a realização deste ensaio na Figura 3.20, Figura 3.21, Figura 3.22, Figura 3.23, Figura 3.24, Figura 3.25, Figura 3.26, Figura 3.27 e Figura 3.28.



Figura 3.20 – Separação dos agregados para execução do ensaio de deformação permanente (simulador de tráfego francês LCPC).



Figura 3.21 – Misturador mecânico utilizado nesta pesquisa.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL



Figura 3.22 – Pesagem do ligante.



Figura 3.23 – Vista interna do misturador mecânico já com os agregados e ligante.



Figura 3.24 – Retirada do material para moldagem dos corpos de prova.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL



Figura 3.25 – Moldagem dos corpos de prova.



Figura 3.26 – Moldagem dos corpos de prova.



Figura 3.27 – Ensaio de deformação permanente (simulador de tráfego francês LCPC).

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL



Figura 3.28 – Medição da deformação em diversos pontos dos corpos de prova.

3.8.2. Resistência da mistura asfáltica compactada ao dano por umidade – Ensaio Lottman (ASTHO T283:1989)

O ensaio Lottman, previsto na norma ASTHO T283:1989, é um ensaio de gelo-degelo que avalia a propriedade de adesividade das misturas asfálticas (TORRES *et al.*, 2010).

Na Figura 3.29 é apresentada uma representação esquemática da ASTHO T283:1989 (KIM; LUTIF, 2006 apud TORRES *et al.*, 2010).

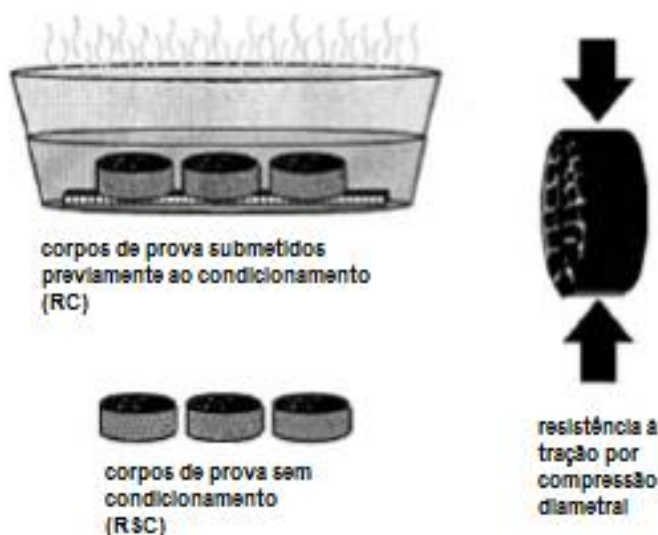


Figura 3.29 – Representação esquemática da ASTHO T283:1989 (KIM; LUTIF, 2006 apud TORRES *et al.*, 2010).

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Foram moldados seis corpos de prova para cada mistura, com o número de golpes necessários para a obtenção de teor de vazios entre 6 e 8%. A seguir, três corpos de prova foram avaliados quanto à resistência à tração por compressão diametral sem nenhum tipo de condicionamento, e os outros três foram submetidos a um ensaio de resistência descrito a seguir.

Os últimos foram sujeitos a um processo de condicionamento especificado na norma AASHTO T-283:1989, simulando a ação do intemperismo nos corpos de prova, através da imersão dos corpos de prova em água, a uma pressão de vácuo de 25,4 cm a 66 cm de coluna de mercúrio por um período de cinco a dez minutos, para aumento do grau de saturação. O corpo de prova saturado foi revestido com filme plástico e colocado em sacos plásticos contendo aproximadamente 10 ml de água.

As amostras foram resfriadas à temperatura de $-18 \pm 3^{\circ}\text{C}$ por 16 horas. Em seguida as amostras foram retiradas da refrigeração e foram imersas em banho à temperatura de $60 \pm 1^{\circ}\text{C}$ por 24 horas. E, por último, foram destinadas a outro banho com temperatura de $25 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ por um período de 2 ± 1 hora e então submetidas ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral, com o intuito de se observar a variação de resistência à tração, após variações bruscas de temperatura.

O resultado do ensaio é obtido em percentual, sendo reportado pela relação entre a média dos valores de resistência à tração dos corpos de prova submetidos previamente ao condicionamento (RC) e, a resistência dos corpos de prova sem condicionamento (RSC), conforme Equação 3.14.

Equação 3.14 – relação entre RC e RSC (RRT) em %.

$$RRT = \frac{RC}{RSC}, \text{ onde:}$$

RC = Média dos valores de resistência à tração dos corpos de prova submetidos previamente ao condicionamento (em kgf/cm^2); e

RSC = Média dos valores de resistência dos corpos de prova sem condicionamento (em kgf/cm^2).

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

RRT = Relação entre a média dos valores de resistência à tração dos corpos de prova submetidos previamente ao condicionamento (RC) e, a resistência dos corpos de prova sem condicionamento (RSC).

São apresentados os equipamentos utilizados, bem como procedimentos seguidos, para a realização deste ensaio na Figura 3.30, Figura 3.31, Figura 3.32, Figura 3.33, Figura 3.34, Figura 3.35, Figura 3.36, Figura 3.37 e Figura 3.38.



Figura 3.30 – Separação dos agregados para execução do ensaio de resistência da mistura asfáltica compactada ao dano por umidade (ensaio Lottman).



Figura 3.31 – Moldagem dos corpos de prova.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL



Figura 3.32 – Saturação à vácuo dos corpos de prova.



Figura 3.33 – Saturação à vácuo dos corpos de prova.



Figura 3.34 – Aplicação de filme plástico nos corpos de prova.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL



Figura 3.35 – Congelamento dos corpos de prova.



Figura 3.36 – Banho à 60°C dos corpos de prova.



Figura 3.37 – Rompimento dos corpos de prova saturados.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL



Figura 3.38 – Rompimento dos corpos de prova secos.

Devido ao elevado grau de complexidade do ensaio de verificação da resistência da mistura asfáltica compactada ao dano por umidade, ensaio Lottman, somente foram estudadas a mistura referência e a mistura A30G100, sendo esta a que apresenta a pior condição quanto à umidade, por ser a mistura com maior absorção estudada nessa pesquisa.

3.9. Corpos de prova estudados nesse trabalho

Neste trabalho foram estudados corpos de prova conforme apresentados na Tabela 3.13, resultando, assim, em 157 corpos de prova estudados.

Tabela 3.13 – Quantidade de corpos de prova estudados nesta pesquisa.

Ensaio	Corpos de Prova
Dosagem Marshall	75
Ensaio RICE	50
Deformação permanente (simulador de tráfego francês LCPC)	10
Ensaio Lottman	22
Total	157

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL



Figura 3.39 – Corpos de prova para a dosagem Marshall.

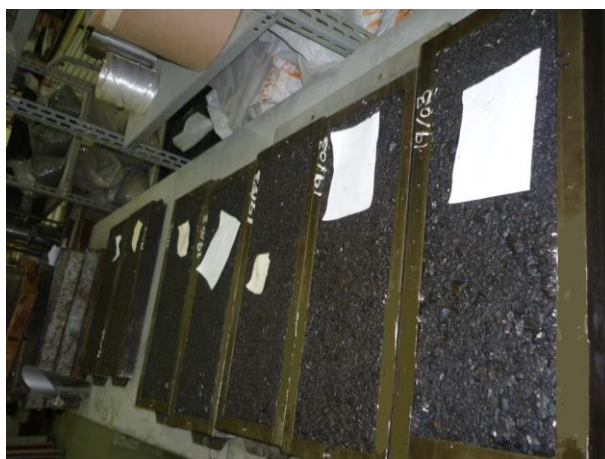


Figura 3.40 – Corpos de prova para o ensaio deformação permanente (simulador de tráfego francês LCPC).



Figura 3.41 – Corpos de prova separados para a saturação do ensaio de resistência da mistura asfáltica compactada ao dano por umidade (ensaio Lottman).

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

São apresentados corpos de prova para a dosagem Marshall, corpos de prova para o ensaio de deformação permanente (simulador de tráfego francês LCPC) e corpos de prova para o ensaio Lottman na Figura 3.39, Figura 3.40 e Figura 3.41, respectivamente.

A Tabela 3.14, apresenta a quantidade, em quilogramas, de agregado e ligante utilizados para todos os ensaios realizados nessa pesquisa.

Tabela 3.14 – Quantidade de agregados e ligante utilizados na pesquisa.

Material	Quantidade utilizada (kg)
Brita 1 - AN	78,97
Brita 1 - A20	20,01
Brita 1 - A30	74,81
Brita 1 - A40	20,01
Pedrisco - AN	70,82
Pedrisco - A20	10,00
Pedrisco - A30	71,25
Pedrisco - A40	10,00
Pó de pedra	590,08
CAP 50/70	34,26

3.10. Alvo desejado para as propriedades mecânicas estudadas

O alvo desejado para as propriedades mecânicas estudadas, de acordo com a bibliografia pesquisada, é apresentado na Tabela 3.15.

Tabela 3.15 – Alvo desejado para as propriedades mecânicas estudadas.

Designação	Alvo
Deformação Permanente (simulador de tráfego francês LCPC)	Até 5% (Moura, 2010)
Ensaio de resistência das misturas asfálticas compactadas quanto ao dano por umidade induzida (ensaio Lottman)	RRT \geq 70% (AASHTO T 283-89)

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesse capítulo são analisados os resultados obtidos em laboratório na caracterização dos agregados naturais e agregados graúdos reciclados de concreto, já apresentados no Capítulo 3, e são apresentados e analisados os resultados referentes à caracterização mecânica dos CBUQs produzidos no decorrer do programa experimental.

4.1. Caracterização dos agregados

A Tabela 4.1 e a Tabela 4.2 a seguir apresentam um resumo dos resultados de caracterização, já apresentados no Capítulo 3 deste trabalho, dos agregados graúdos, brita 1 e pedrisco, naturais e reciclados estudados nesta pesquisa, após todas as conclusões das repetições e análises estatísticas efetuadas. Nos subitens seguintes são discutidos alguns resultados.

Tabela 4.1 – Resumo das propriedades e resultados dos agregados graúdos naturais e reciclados tipo Brita 1.

Propriedade	Absorção de água	Massa específica real	Massa específica aparente	Abrasão Los Angeles
Unidade	%	g/cm ³	g/cm ³	%
Agr. natural	0,5	2,756	2,720	16
20 MPa	4,6	2,688	2,388	32
30 MPa	4,3	2,706	2,419	27
40 MPa	5,4	2,726	2,387	25

Tabela 4.2 – Resumo das propriedades e resultados dos agregados graúdos naturais e reciclados tipo Pedrisco.

Propriedade	Absorção de água	Massa específica real	Massa específica aparente
Unidade	%	g/cm ³	g/cm ³
Agr. natural	0,8	2,684	2,629
20 MPa	8,3	2,666	2,142
30 MPa	9,1	2,653	2,119
40 MPa	8,6	2,690	2,188

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1.1. Absorção

Tabela 4.3 – Absorção.

ABSORÇÃO (%)	A20	A30	A40	AN
Brita 1	4,6	4,3	5,4	0,5
Pedrisco	8,3	9,1	8,6	0,8

É consenso no meio acadêmico, conforme já apresentado na revisão bibliográfica, que a absorção dos agregados reciclados de concreto é maior que a absorção dos agregados naturais, fato também observado nesse trabalho, conforme se verifica através da Tabela 4.3.

Conforme se observa na Tabela 2.23, apresentada na revisão bibliográfica desse trabalho, que para agregado graúdo reciclado de concreto, o valor mínimo de absorção encontrado foi igual a 2,60% por Ron *et al.* (2008) e o valor máximo de absorção foi igual a 11% por Frota *et al.* (2006).

Desta forma, verifica-se que em comparação a pesquisas anteriores, os valores de absorção obtidos nesta pesquisa estão de acordo com o pesquisado.

4.1.2. Desgaste por abrasão Los Angeles – apenas para Brita 1

O ensaio de abrasão Los Angeles foi realizado conforme a norma ABNT NBR NM 51:2001, que determina que o percentual de desgaste por abrasão Los Angeles deve ser menor ou igual a 50%. Verificou-se que o agregado reciclado graúdo de concreto tipo A20 apresentou o maior desgaste por abrasão Los Angeles, igual a 32%, para o A30, o desgaste por abrasão Los Angeles observado foi igual a 27%, já para o A40, foi igual a 25%. Observa-se que todos esses valores são superiores ao da brita natural, que apresentou desgaste por abrasão Los Angeles igual a 16%, porém, todos se encontram dentro dos limites normatizados para uso em pavimentação.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Verifica-se, na Figura 4.1, que existe uma tendência de aumento do desgaste por abrasão Los Angeles em função da absorção dos agregados, desta forma, é possível que a diferença encontrada entre o desgaste por abrasão Los Angeles para os ARCg e o agregado natural tenha ocorrido em função da porosidade desses agregados, que é diretamente relacionada à absorção.

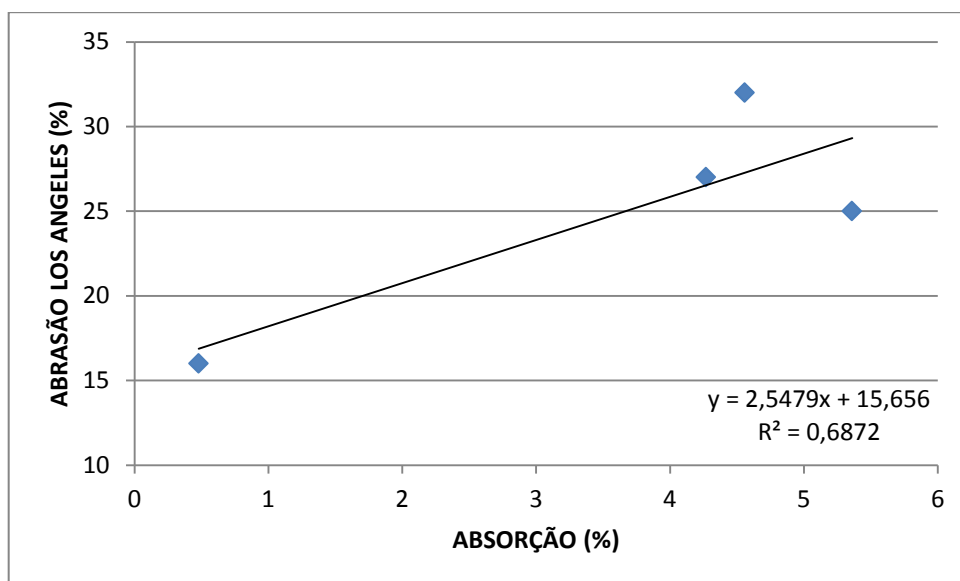


Figura 4.1 – Abrasão Los Angeles x absorção – BRITA 1.

Além disso, foi possível verificar uma tendência de redução do desgaste por abrasão Los Angeles, conforme o aumento da resistência do concreto que originou o ARCg, conforme se observa na Figura 4.2.

Conforme se observa na Tabela 2.23, apresentada na revisão bibliográfica desse trabalho, que para agregado gráúdo reciclado de concreto, o valor mínimo de desgaste por abrasão Los Angeles encontrado foi igual a 25,5% por Arabani e Azarhoosh (2012) e o valor máximo de desgaste por abrasão Los Angeles foi igual a 52% por Fernandes (2004).

Desta forma, verifica-se que em comparação a pesquisas anteriores, os valores de desgaste por abrasão Los Angeles obtidos nesta pesquisa estão de acordo com o pesquisado.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

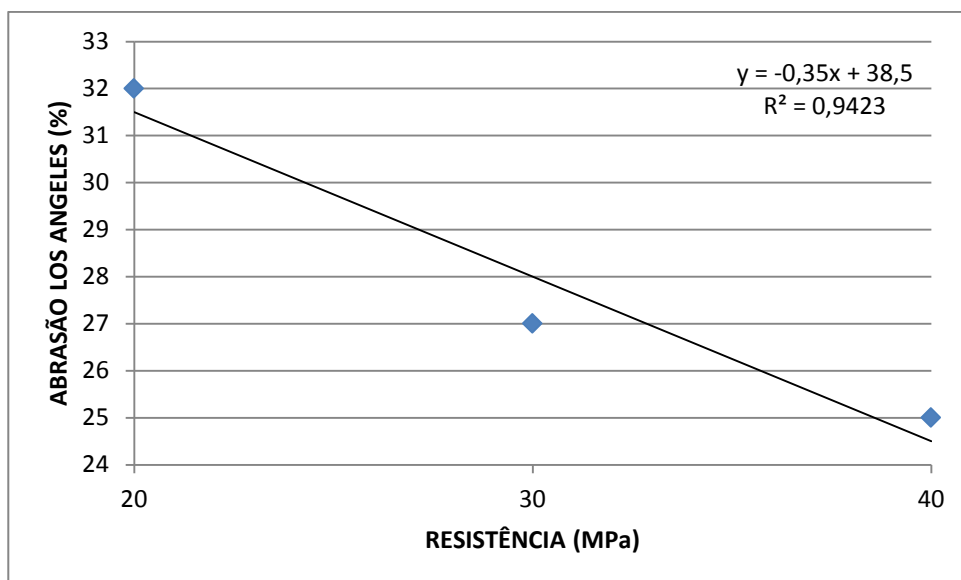


Figura 4.2 – Abrasão Los Angeles x resistência à compressão do concreto – BRITA 1.

4.1.3. Massa específica aparente

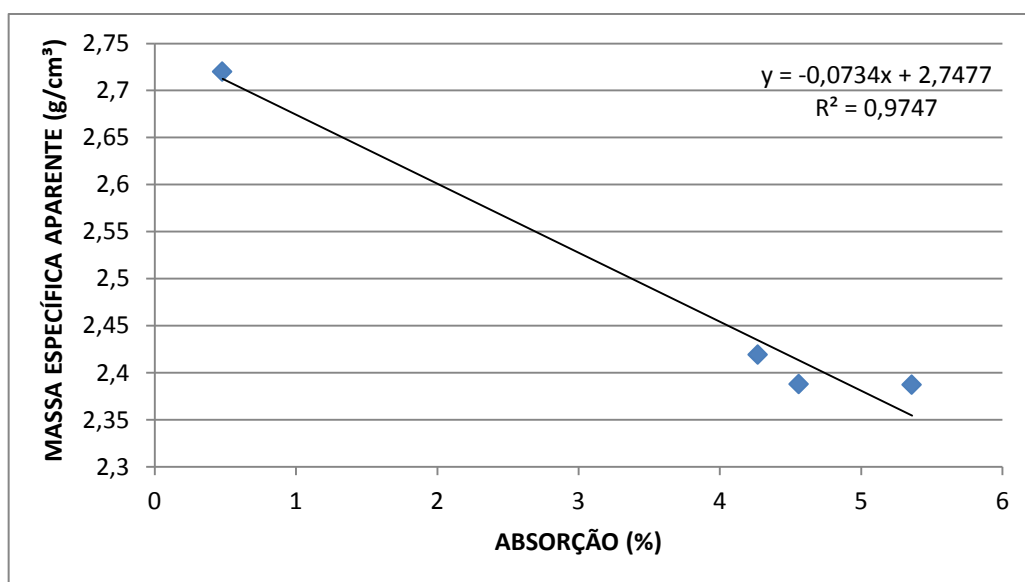


Figura 4.3 – Massa específica aparente x absorção de água – BRITA 1.

Através de uma comparação entre a absorção e a massa específica aparente dos agregados graúdos, brita 1 e pedrisco, naturais e reciclados estudados

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

nesta pesquisa, verifica-se que os reciclados de concreto possuem maior absorção e maior porosidade e, conseqüentemente, menor massa específica aparente quando comparados aos agregados naturais, cuja tendência se observa na Figura 4.3 e Figura 4.4.

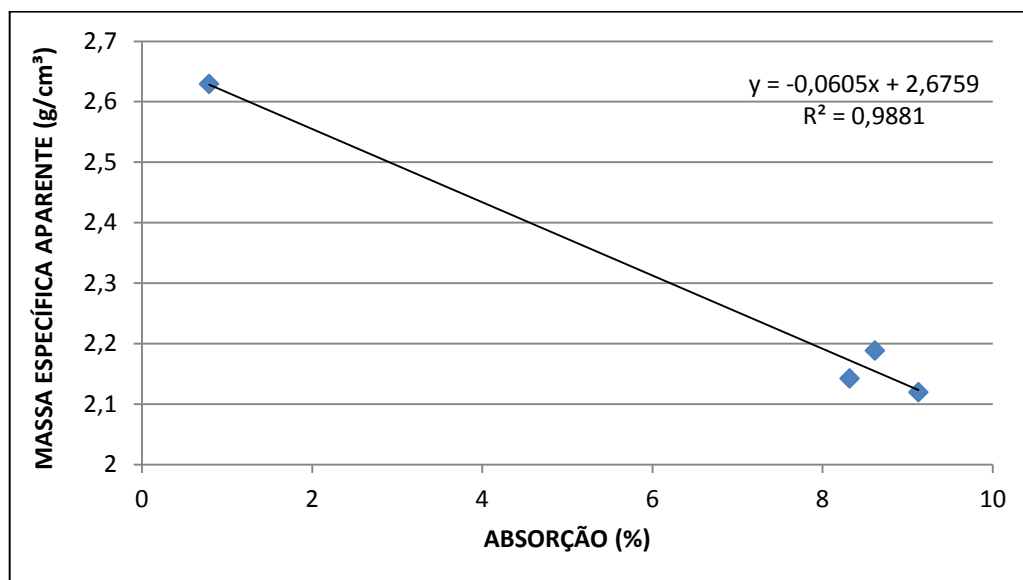


Figura 4.4 – Massa específica aparente x absorção de água – PEDRISCO.

Conforme se observa na Tabela 2.23, apresentada na revisão bibliográfica desse trabalho, para agregado gráúdo reciclado de concreto, o valor mínimo de massa específica aparente encontrado foi igual a 2,43 g/cm³ por Mills-Beale; You (2010) e o valor máximo de massa específica aparente foi igual a 2,71 g/cm³ por Paravithana e Mohajerani (2006).

Os valores obtidos para massa específica aparente dos ARCg tipo brita 1 estão entre 2,39 e 2,42 e dos ARCg tipo pedrisco estão entre 2,12 e 2,19, portanto, um pouco inferior em comparação com pesquisas anteriores, corroborando para afirmar que o agregado utilizado nessa pesquisa era mais poroso do que o utilizado nas demais pesquisas verificadas.

4.1.4. Massa específica real

Já quanto aos resultados obtidos de massa específica real, verifica-se, através de uma comparação entre a massa específica aparente e a massa

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

específica real dos agregados graúdos, brita 1 e pedrisco, naturais e reciclados estudados nesta pesquisa, que praticamente não há influência da porosidade dos grãos, esses resultados são demonstrados nas Tabela 4.4 e Tabela 4.5, isso porque a massa específica real é a relação entre a massa e o volume de grãos do agregado, excluindo-se os poros permeáveis e os vazios entre os grãos, comprovando ainda mais assim, a influência da absorção e porosidade do agregado reciclado de concreto em se tratando da massa específica aparente.

Tabela 4.4 – Massa específica aparente x massa específica real – BRITA 1.

BRITA 1	A20	A30	A40	AN
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,388	2,419	2,387	2,720
Massa específica real (g/cm ³)	2,688	2,706	2,726	2,756

Tabela 4.5 – Massa específica aparente x massa específica real – PEDRISCO.

PEDRISCO	A20	A30	A40	AN
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,142	2,119	2,188	2,629
Massa específica real (g/cm ³)	2,666	2,653	2,690	2,684

4.2. Massa específica aparente ponderada das misturas de agregados

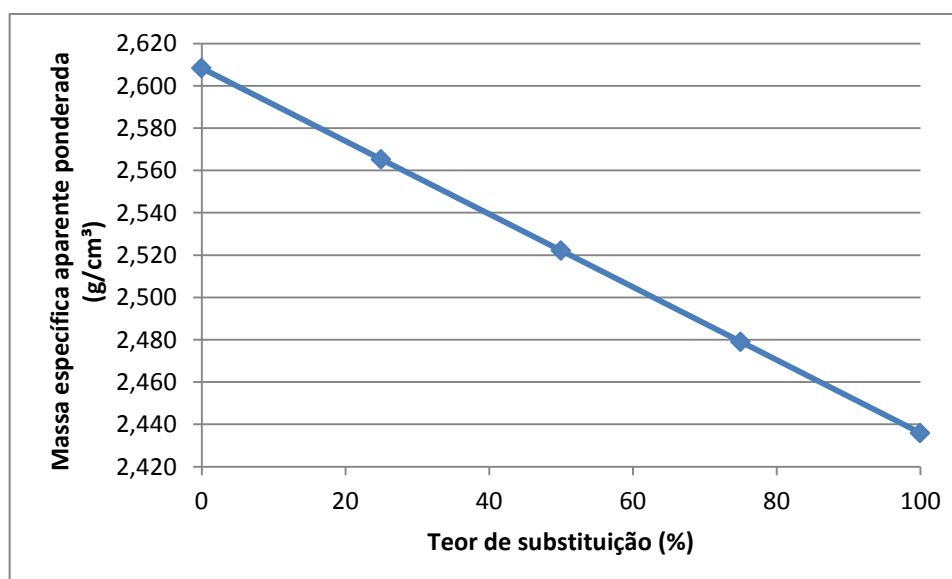


Figura 4.5 – Massa específica aparente ponderada das misturas de agregados.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

É possível verificar que, quanto maior o percentual de agregado reciclado no traço, menor se torna a massa específica aparente ponderada das misturas de agregados, esse fator se deve à absorção e porosidade dos agregados, conforme Figura 4.5.

4.3. Parâmetros volumétricos da dosagem Marshall e ensaio RICE

Os requisitos de dosagem de concreto asfáltico da DNIT-ES 031:2006 são apresentados na Tabela 3.12.

Tabela 4.6 – Parâmetros da dosagem Marshall e ensaio RICE para o traço AN.

Características e parâmetros da dosagem Marshall e ensaio RICE Traço AN	Teor de ligante				
	4,00%	4,50%	5,00%	5,50%	6,00%
Gmb - Massa específica aparente (g/cm ³)	2,42	2,44	2,45	2,46	2,47
DMM - Densidade Máxima Medida - RICE (g/cm ³)	2,57	2,56	2,53	2,52	2,51
Vv - Volume de vazios (%)	5,77*	4,65	3,24	2,39*	1,60*
VCB - Vazios com betume (%)	9,55	10,84	12,08	13,38	14,63
VAM - Vazios do agregado mineral (%)	15,32	15,49	15,32	15,77	16,23
RBV - Relação betume/vazios (%)	62,32*	69,97*	78,86	84,86*	90,15*
ρ_{ef} - Densidade efetiva do agregado (g/cm ³)	2,74	2,76	2,75	2,76	2,77
Aabs - Absorção de asfalto (%)	1,88	2,09	1,95	2,19	2,30
Aef - Quantidade de asfalto efetivo na mistura (%)	2,12	2,41	3,05	3,31	3,70
Estabilidade (kgf)	1290,15	1406,81	1439,66	1375,01	1324,28
Fluência (mm)	4,01	4,30	4,48	4,88	5,42

* Destacados os valores fora dos limites especificados para a Faixa C do DNIT

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na Tabela 4.6 observa-se que para o traço feito apenas com AN os teores de 5,5% e 6,0% de ligante causaram baixo volume de vazios e elevada relação betume/vazios, indicando um excesso de ligante na mistura e fazendo com ambos os parâmetros ficassem fora dos limites especificados pela DNIT-ES 031:2006. Para o teor de 4,5% observa-se volume de vazios dentro dos limites especificados pela DNIT-ES 031:2006, porém relação betume/vazios abaixo do especificado, indicando possível ausência de ligante. Para o teor de 4,0% de ligante observou-se elevado volume de vazios e baixa relação betume/vazios, indicando ausência de ligante na mistura e fazendo com ambos os parâmetros ficassem fora dos limites especificados pela DNIT-ES 031:2006. Todos os valores de estabilidade ficaram acima do mínimo especificado pela DNIT-ES 031:2006.

Tabela 4.7 – Parâmetros da dosagem Marshall e ensaio RICE para o traço A30G25.

Características e parâmetros da dosagem Marshall e ensaio RICE Traço A30G25	Teor de ligante				
	5,00%	5,50%	6,00%	6,50%	7,00%
Gmb - Massa específica aparente (g/cm ³)	2,33	2,35	2,36	2,38	2,40
DMM - Densidade Máxima Medida - RICE (g/cm ³)	2,48	2,47	2,46	2,45	2,43
Vv - Volume de vazios (%)	5,98*	5,01*	3,87	2,58*	1,17*
VCB - Vazios com betume (%)	11,50	12,76	13,98	15,29	16,58
VAM - Vazios do agregado mineral (%)	17,48	17,77	17,85	17,87	17,75
RBV - Relação betume/vazios (%)	65,78*	71,78*	78,32	85,55*	93,41*
ρ ef - Densidade efetiva do agregado (g/cm ³)	2,68	2,70	2,70	2,71	2,71
Aabs - Absorção de asfalto (%)	1,71	1,97	1,97	2,14	2,16
Aef - Quantidade de asfalto efetivo na mistura (%)	3,29	3,53	4,03	4,36	4,84
Estabilidade (kgf)	971,73	1113,73	1274,64	1272,57	1141,68
Fluência (mm)	3,48	3,97	3,97	4,37	4,76

* Destacados os valores fora dos limites especificados para a Faixa C do DNIT

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na Tabela 4.7, observa-se que para o traço A30G25, com 25% de substituição de agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados de concreto com 30MPa, os teores de 6,5% e 7,0% de ligante causaram baixo volume de vazios e elevada relação betume/vazios, indicando um excesso de ligante na mistura e fazendo com ambos os parâmetros ficassem fora dos limites especificados pela DNIT-ES 031:2006. Para os teores de 5,0% e 5,5% de ligante observou-se elevado volume de vazios e baixa relação betume/vazios, indicando ausência de ligante na mistura e fazendo com ambos os parâmetros ficassem fora dos limites especificados pela DNIT-ES 031:2006. Todos os valores de estabilidade ficaram acima do mínimo especificado pela DNIT-ES 031:2006.

Tabela 4.8 – Parâmetros da dosagem Marshall e ensaio RICE para o traço A30G50.

Características e parâmetros da dosagem Marshall e ensaio RICE Traço A30G50	Teor de ligante				
	5,00%	5,50%	6,00%	6,50%	7,00%
Gmb - Massa específica aparente (g/cm ³)	2,30	2,31	2,33	2,34	2,34
DMM - Densidade Máxima Medida - RICE (g/cm ³)	2,47	2,45	2,44	2,42	2,40
Vv - Volume de vazios (%)	6,88*	5,65*	4,52	3,24	2,43*
VCB - Vazios com betume (%)	11,33	12,56	13,77	15,04	16,19
VAM - Vazios do agregado mineral (%)	18,21	18,21	18,29	18,28	18,62
RBV - Relação betume/vazios (%)	62,23*	68,97*	75,30	82,29*	86,92*
ρ_{ef} - Densidade efetiva do agregado (g/cm ³)	2,67	2,67	2,67	2,68	2,68
Aabs - Absorção de asfalto (%)	2,18	2,25	2,29	2,39	2,32
Aef - Quantidade de asfalto efetivo na mistura (%)	2,82	3,25	3,71	4,11	4,68
Estabilidade (kgf)	1087,52	1132,96	1314,09	1274,64	1158,08
Fluência (mm)	3,54	3,77	4,03	4,37	3,97

* Destacados os valores fora dos limites especificados para a Faixa C do DNIT

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na Tabela 4.8 observa-se que para o traço A30G50, com 50% de substituição de agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados de concreto com 30MPa, o teor de 7,0% de ligante causou baixo volume de vazios e elevada relação betume/vazios, indicando um excesso de ligante na mistura e fazendo com ambos os parâmetros ficassem fora dos limites especificados pela DNIT-ES 031:2006. Para o teor de 6,5% observa-se volume de vazios dentro dos limites especificados pela DNIT-ES 031:2006, porém relação betume/vazios acima do especificado, indicando possível excesso de ligante. Para os teores de 5% e 5,5% de ligante observou-se elevado volume de vazios e baixa relação betume/vazios, indicando ausência de ligante na mistura e fazendo com ambos os parâmetros ficassem fora dos limites especificados pela DNIT-ES 031:2006. Todos os valores de estabilidade ficaram acima do mínimo especificado pela DNIT-ES 031:2006.

Tabela 4.9 – Parâmetros da dosagem Marshall e ensaio RICE para o traço A30G75.

Características e parâmetros da dosagem Marshall e ensaio RICE Traço A30G75	Teor de ligante				
	5,00%	5,50%	6,00%	6,50%	7,00%
Gmb - Massa específica aparente (g/cm ³)	2,28	2,29	2,29	2,31	2,32
DMM - Densidade Máxima Medida - RICE (g/cm ³)	2,45	2,43	2,41	2,39	2,38
Vv - Volume de vazios (%)	7,09*	5,78*	4,91	3,63	2,50*
VCB - Vazios com betume (%)	11,24	12,43	13,56	14,80	16,03
VAM - Vazios do agregado mineral (%)	18,32	18,21	18,48	18,42	18,53
RBV - Relação betume/vazios (%)	61,32*	68,28*	73,42*	80,30	86,51*
ρ_{ef} - Densidade efetiva do agregado (g/cm ³)	2,65	2,65	2,64	2,64	2,65
Aabs - Absorção de asfalto (%)	2,61	2,58	2,50	2,53	2,61
Aef - Quantidade de asfalto efetivo na mistura (%)	2,39	2,92	3,50	3,97	4,39

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Continuação da Tabela 4.9 – Parâmetros da dosagem Marshall e ensaio RICE para o traço A30G75.

Características e parâmetros da dosagem Marshall e ensaio RICE Traço A30G75	Teor de ligante				
	5,00%	5,50%	6,00%	6,50%	7,00%
Estabilidade (kgf)	1060,78	1147,16	1217,80	1212,13	1108,88
Fluência (mm)	3,50	3,97	4,17	4,50	4,90

** Destacados os valores fora dos parâmetros para a Faixa C do DNIT*

Na Tabela 4.9, observa-se que para o traço A30G75, com 75% de substituição de agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados de concreto com 30MPa, o teor de 7,0% de ligante causou baixo volume de vazios e elevada relação betume/vazios, indicando um excesso de ligante na mistura e fazendo com ambos os parâmetros ficassem fora dos limites especificados pela DNIT-ES 031:2006. Para o teor de 6,0 % observa-se volume de vazios abaixo dos limites especificados pela DNIT-ES 031:2006, porém relação betume/vazios acima do especificado, indicando possível ausência de ligante. Para os teores de 5,0% e 5,5% de ligante observou-se elevado volume de vazios e baixa relação betume/vazios, indicando ausência de ligante na mistura e fazendo com ambos os parâmetros ficassem fora dos limites especificados pela DNIT-ES 031:2006. Todos os valores de estabilidade ficaram acima do mínimo especificado pela DNIT-ES 031:2006.

Na Tabela 4.10, observa-se que para o traço A30G100, com todos os agregados graúdos naturais substituídos por agregados graúdos reciclados de concreto com 30MPa, os teores de 5,0%, 5,5%, 6,0% e 6,5% de ligante causaram elevado volume de vazios e baixa relação betume/vazios, indicando um ausência de ligante na mistura e fazendo com ambos os parâmetros ficassem fora dos limites especificados pela DNIT-ES 031:2006. Todos os valores de estabilidade ficaram acima do mínimo especificado pela DNIT-ES 031:2006.

Além de sinalizar com asterisco os parâmetros fora dos limites especificados para a faixa C do DNIT, foi realizado um destaque com cor, para que seja possível visualizar facilmente que, conforme se aumenta o teor de substituição de agregado

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

natural por ARCG, existe uma tendência clara de aumento do volume de vazios e redução da relação betume vazios, conforme Tabela 4.6, da Tabela 4.7, da Tabela 4.8, da Tabela 4.9 e da Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Parâmetros da dosagem Marshall e ensaio RICE para o traço A30G100.

Características e parâmetros da dosagem Marshall e ensaio RICE Traço A30G100	Teor de ligante				
	5,00%	5,50%	6,00%	6,50%	7,00%
Gmb - Massa específica aparente (g/cm ³)	2,22	2,22	2,23	2,24	2,26
DMM - Densidade Máxima Medida - RICE (g/cm ³)	2,43	2,40	2,38	2,37	2,34
Vv - Volume de vazios (%)	8,67*	7,41*	6,55*	5,52*	3,79
VCB - Vazios com betume (%)	10,93	12,07	13,19	14,36	15,59
VAM - Vazios do agregado mineral (%)	19,61	19,48	19,74	19,88	19,38
RBV - Relação betume/vazios (%)	55,77*	61,94*	66,83*	72,24*	80,45
ρ_{ef} - Densidade efetiva do agregado (g/cm ³)	2,62	2,61	2,61	2,61	2,60
Aabs - Absorção de asfalto (%)	2,89	2,75	2,76	2,81	2,66
Aef - Quantidade de asfalto efetivo na mistura (%)	2,11	2,75	3,24	3,69	4,34
Estabilidade (kgf)	1009,68	1131,48	1254,20	1132,75	1020,80
Fluência (mm)	3,50	3,83	4,00	4,37	4,76

* Destacados os valores fora dos parâmetros para a Faixa C do DNIT

4.3.1. Massa específica aparente (GMB)

Observa-se na Figura 4.6 que existe uma tendência de aumento da massa específica aparente – GMB, à medida que se aumenta o teor de ligante, como era de se esperar, uma vez que o CAP acaba preenchendo os vazios entre os agregados, aumentando, conseqüentemente, a massa específica. Também se

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

observa que, conforme se aumenta o percentual de substituição de agregado natural por ARCg, a massa específica da mistura reduz, esse fato ocorreu devido à massa específica dos grãos de agregado reciclado de concreto, que são menores que dos agregados naturais.

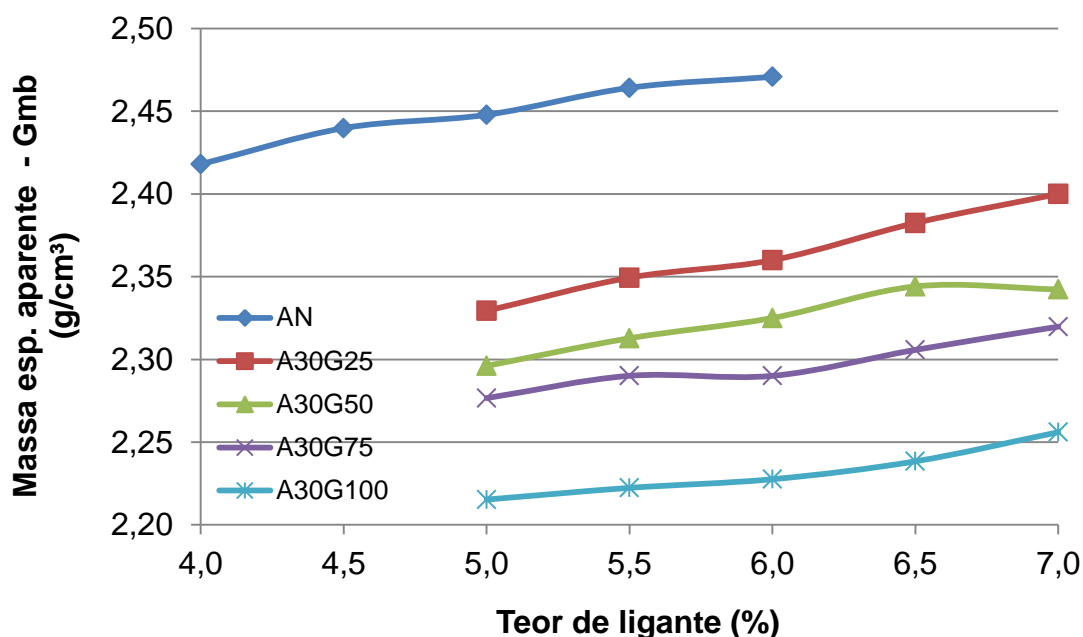


Figura 4.6 – Curvas de GMB por teor de ligante.

4.3.2. Densidade Máxima Medida (DMM)

Na Figura 4.7 nota-se que, para todos os traços, à medida que aumenta o teor de ligante diminui a DMM, pois ao aumentar o percentual em peso de asfalto na mistura, o percentual em peso dos agregados é reduzido, proporcionalmente, implicando na diminuição da densidade da mistura. Além disso, nota-se que a DMM diminui conforme se aumenta o percentual de substituição de agregado natural por ARCg, a massa específica da mistura reduz, devido à massa específica dos grãos de agregado reciclado de concreto serem menores que dos agregados naturais.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

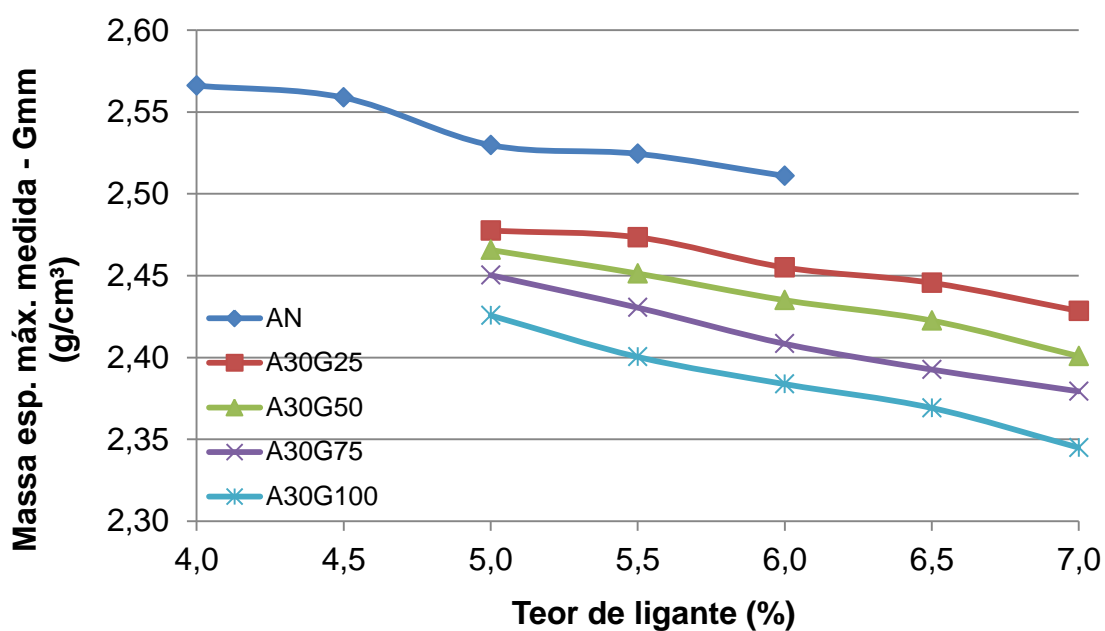


Figura 4.7 - Curvas de DMM por teor de ligante.

4.3.3. Relação betume vazios (RBV)

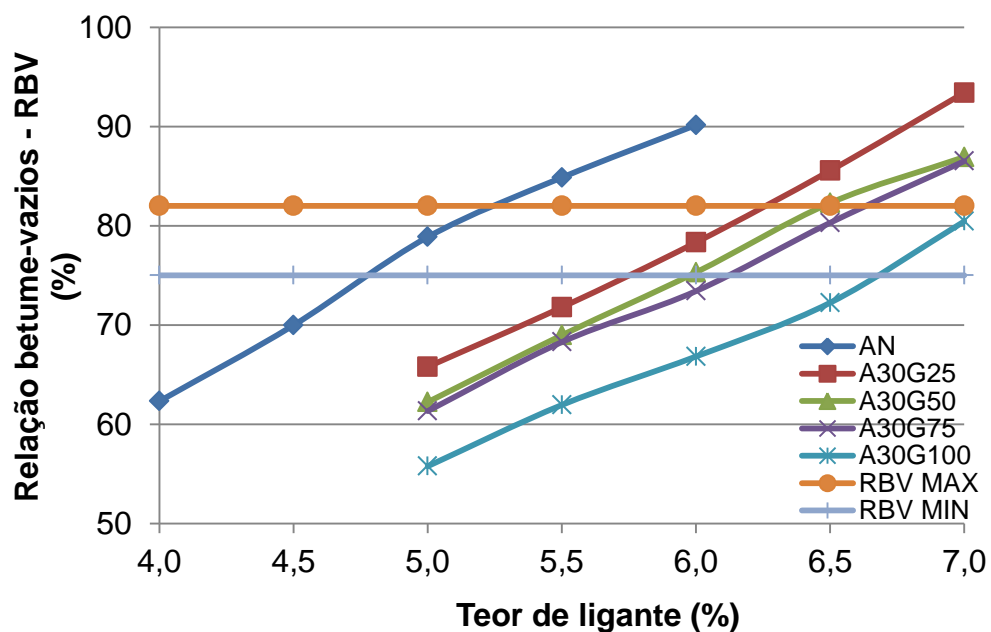


Figura 4.8 - Curvas de RBV por teor de ligante.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Observa-se na Figura 4.8 que existe uma tendência de aumento do RBV à medida que se aumenta o teor de ligante, como era de se esperar, uma vez que o CAP acaba preenchendo os vazios entre os agregados. Também se observa que, conforme se aumenta o percentual de substituição de agregado natural por ARCg, a relação betume vazios da mistura tende a ser menor.

4.3.4. Volume de vazios (Vv)

Observa-se na Figura 4.9 que existe uma tendência de redução do Vv à medida que se aumenta o teor de ligante, como era de se esperar, uma vez que o CAP acaba preenchendo os vazios entre os agregados. Também se observa que, conforme se aumenta o percentual de substituição de agregado natural por ARCg, o volume de vazios da mistura tende a ser maior, devido à absorção dos grãos de agregado reciclado de concreto ser maior que dos agregados naturais.

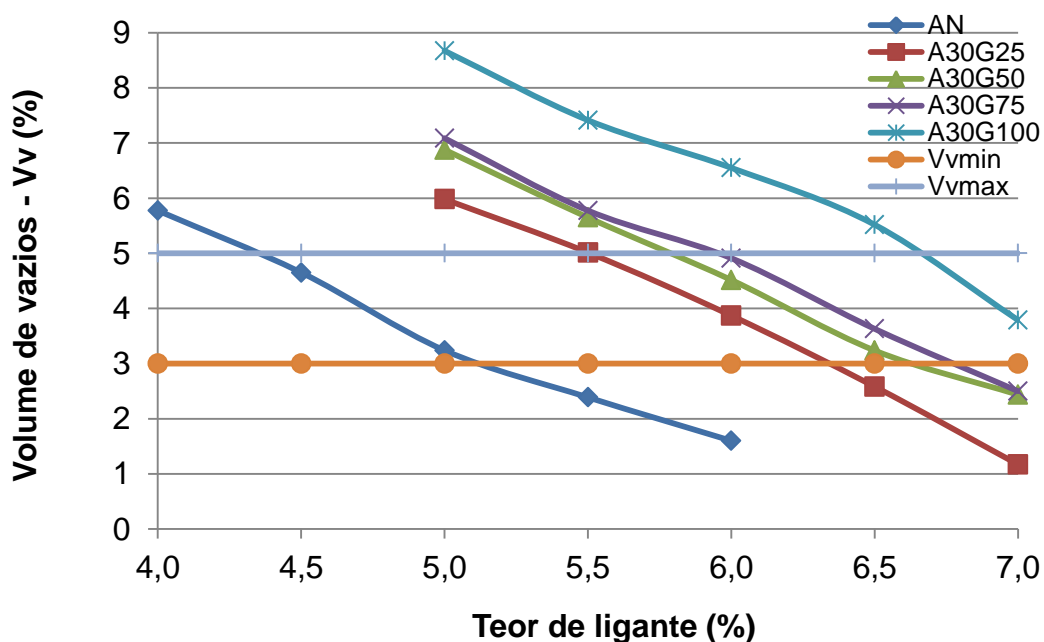


Figura 4.9 - Curvas de VV por teor de ligante.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.3.5. Vazios com betume (VCB)

Observa-se na Figura 4.10 que existe uma tendência de aumento do VCB à medida que se aumenta o teor de ligante, como era de se esperar, uma vez que o CAP acaba preenchendo os vazios entre os agregados. Também se observa que, conforme se aumenta o percentual de substituição de agregado natural por ARCg, os vazios com betume das misturas tende a reduzir, devido à maior absorção dos grãos de agregado reciclado de concreto em comparação aos agregados naturais.

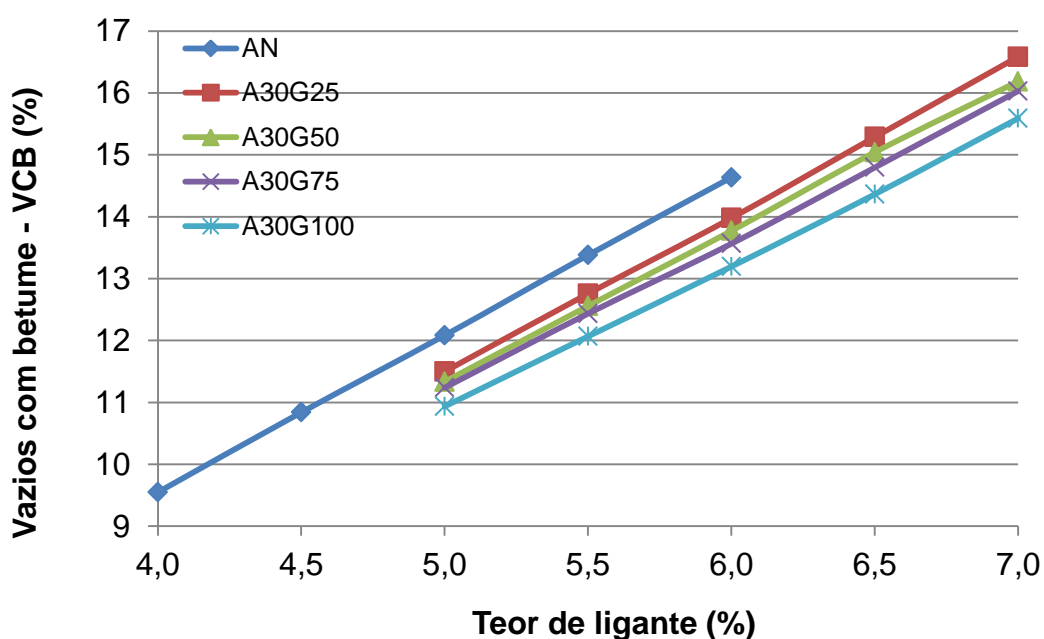


Figura 4.10 - Curvas de VCB por teor de ligante.

4.3.6. Vazios do agregado mineral (VAM)

Observando a Figura 4.11 nota-se uma leve tendência em que à medida que se aumenta o teor de ligante, o VAM, volume de vazios com ar e asfalto efetivo, também aumenta, indicando que o ligante pode estar preenchendo e aumentando a distância entre as partículas dos agregados. Para os agregados utilizados na pesquisa, que apresentaram dimensão máxima característica de 19 mm, o valor mínimo de VAM, de acordo com a especificação de serviço DNIT-ES 031:2006, é 15%, verifica-se, assim, que todas as misturas ficaram com os valores de VAM dentro do especificado por norma.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

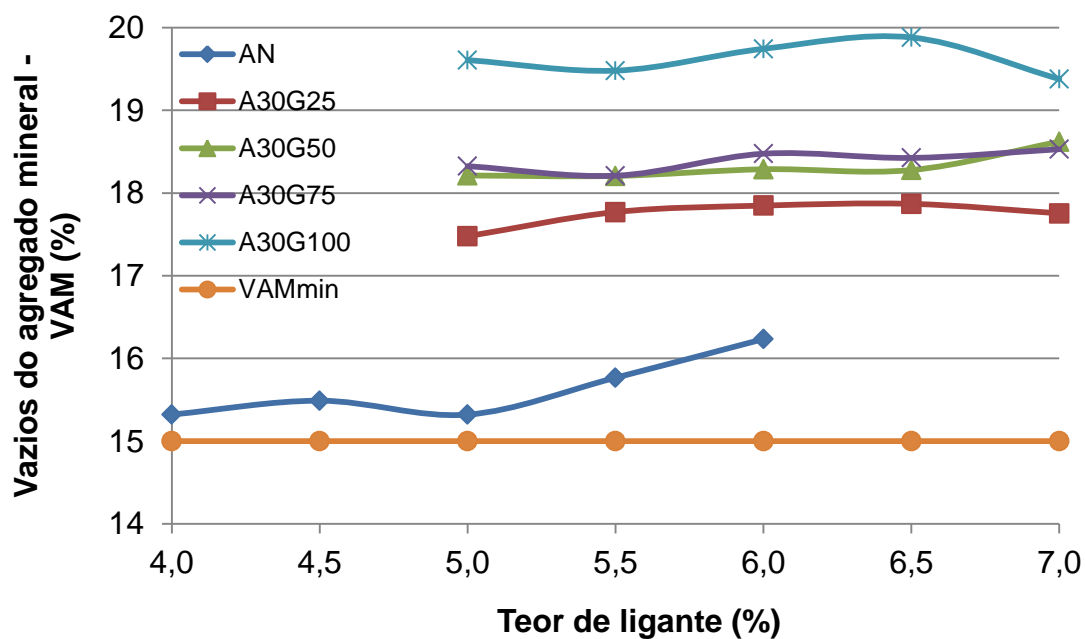


Figura 4.11 – Curvas de VAM por teor de ligante.

4.3.7. Estabilidade

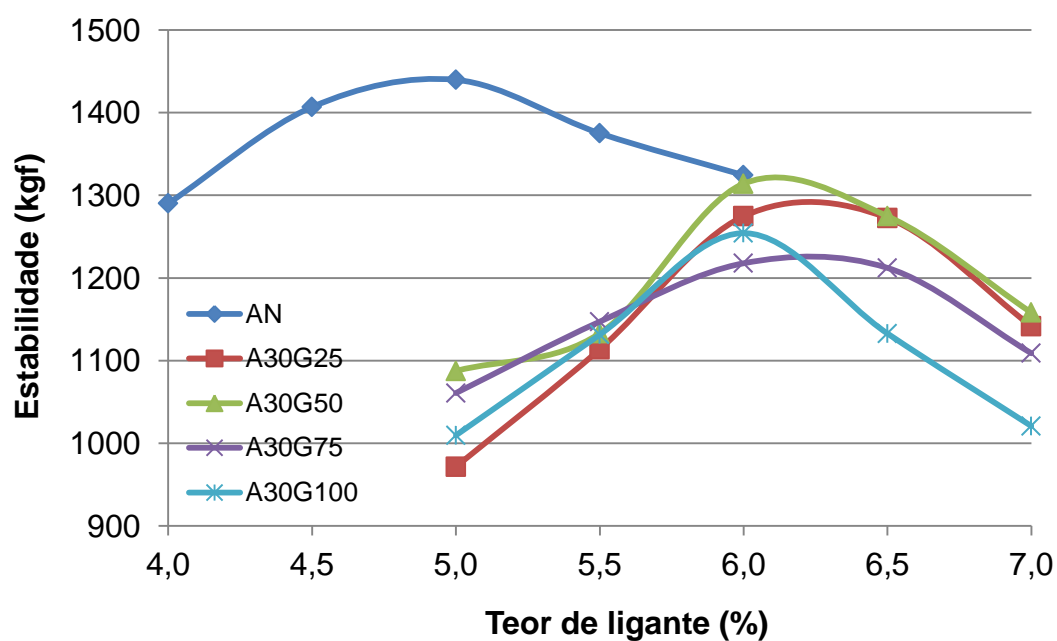


Figura 4.12 - Curvas de estabilidade por teor de ligante.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A estabilidade considerada para os cálculos que irão definir os teores ótimos de ligante é a máxima entre todos os traços de dosagem. De acordo com a Figura 4.12, observa-se que as curvas de estabilidade apresentam picos bem definidos, onde se concentram as máximas estabilidades das misturas. Para o traço AN a estabilidade máxima foi observada para o teor de 5,0% e para as demais misturas, para o teor de 6,0%. Não se observa uma tendência clara de aumento ou diminuição da estabilidade com o aumento do teor de ligante, nem tão pouco relação com o teor de substituição por ARCG. Apenas se observa que o valor de estabilidade para o traço AN é superior que o valor de estabilidade para as os demais traços. Todos os valores de estabilidade verificados nesta pesquisa ficaram acima do mínimo especificado pela DNIT-ES 031:2006.

4.3.8. Fluência

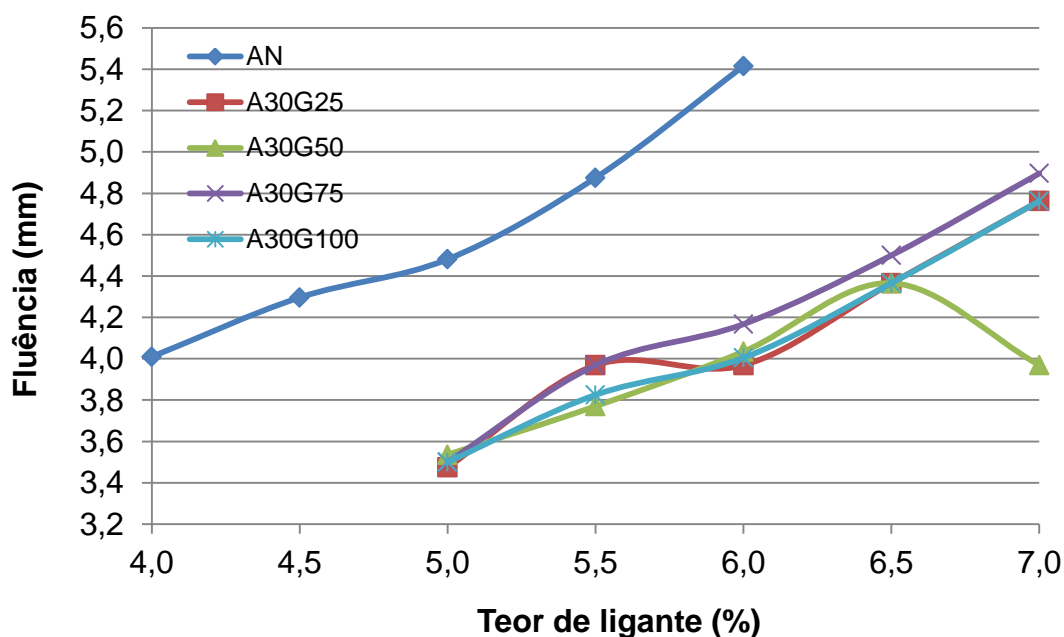


Figura 4.13 - Curvas de fluência por teor de ligante.

De acordo com a Figura 4.13, observa-se uma tendência de aumento da fluência com o aumento do teor de ligante, exceto para a fluência do teor de ligante de 7% do traço A30G50 e para a fluência do teor de ligante de 5,5% do traço

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A30G25, sendo que não foi possível identificar uma causa para tais pontos saírem da tendência prevista para esse tipo de curva. Admite-se que possa ter ocorrido problemas na execução do ensaio nesses pontos, porém, por não influenciarem no valor do teor ótimo de ligante, a repetição desses ensaios foi considerada desnecessária. Apesar de ser possível verificar que o valor de fluência para o traço AN é superior que o valor de fluência para os demais traços, não é possível observar relação com essa propriedade e o teor de substituição por ARCg.

4.3.9. Densidade efetiva do agregado (ρ_{ef})

De acordo com a Figura 4.14, observa-se que não existe relação entre o aumento do teor de ligante e a densidade efetiva do agregado, se apresentando praticamente constante. Porém, se observa claramente que a densidade efetiva do agregado diminui conforme se aumenta o percentual de substituição de agregado natural por ARCg, e isso ocorre pois a massa específica da mistura reduz, devido à massa específica dos grãos de agregado reciclado de concreto serem menores que dos agregados naturais.

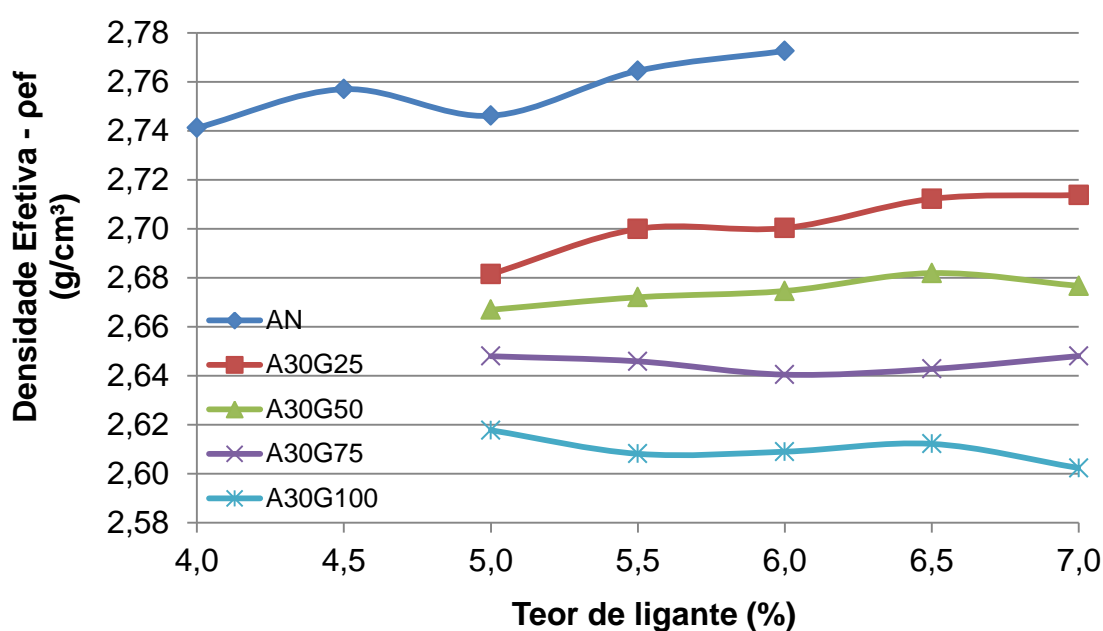


Figura 4.14 - Curvas de ρ_{ef} por teor de ligante.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.3.10. Absorção de asfalto por massa de agregado (Aabs)

De acordo com a Figura 4.15, à exceção do traço AN, se observa que, conforme se aumenta o percentual de substituição de agregado natural por ARCg a absorção de asfalto por massa de agregado aumenta.

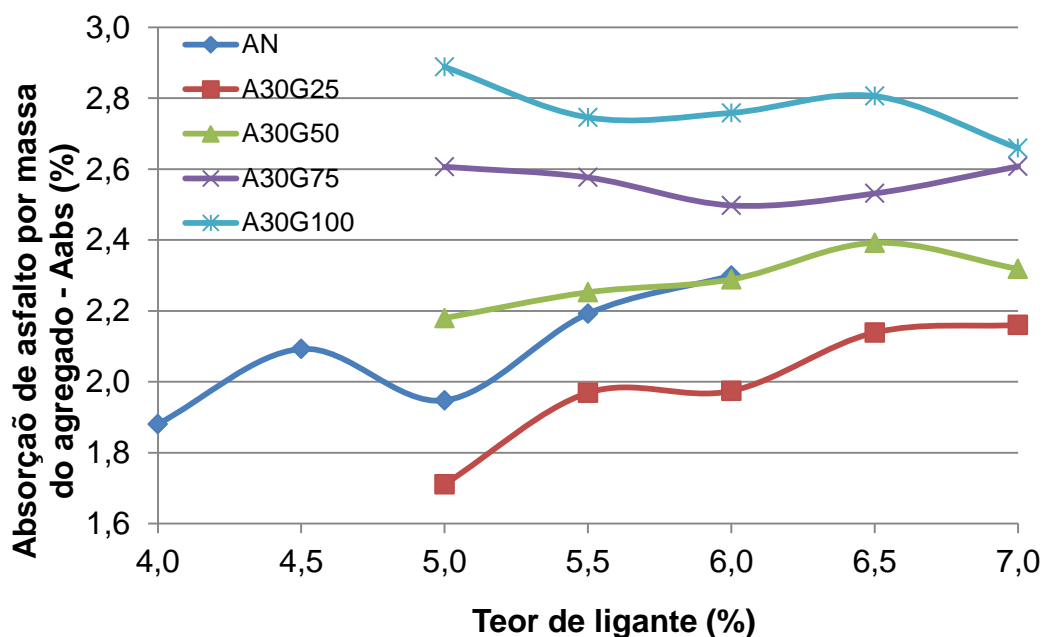


Figura 4.15 - Curvas de Aabs por teor de ligante.

4.3.11. Quantidade de asfalto efetivo na mistura (Aef)

De acordo com a Figura 4.16, observa-se que conforme se aumenta o teor de ligante, a quantidade de asfalto efetivo na mistura também aumenta. À exceção do traço AN, se observa que, conforme se aumenta o percentual de substituição de agregado natural por ARCg a absorção de asfalto por massa de agregado diminui.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

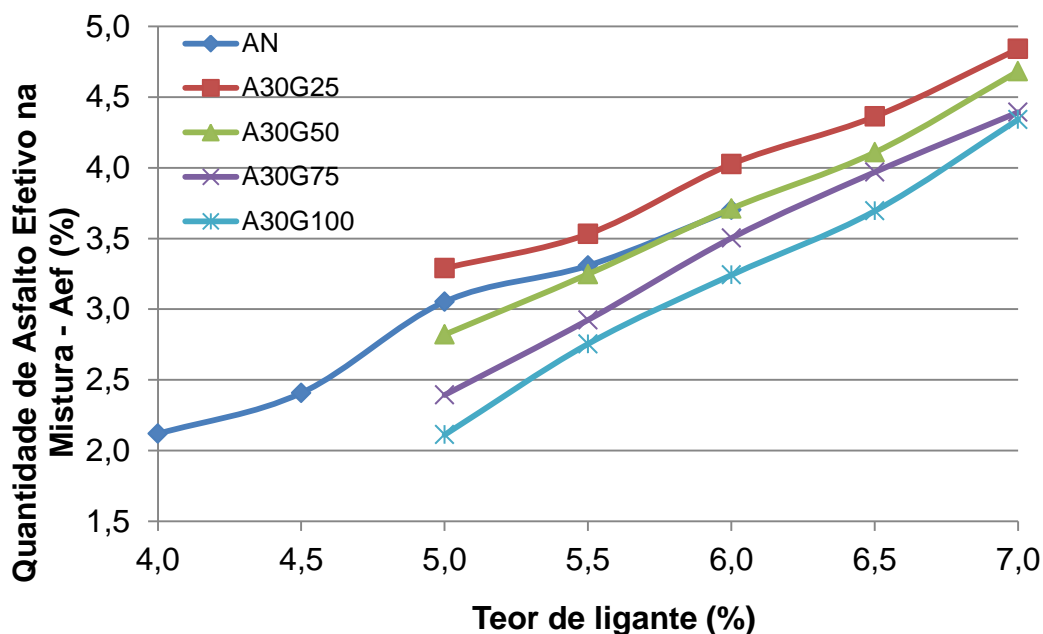


Figura 4.16 - Curvas de Aef por teor de ligante.

4.4. Teores ótimos de ligante

Para a determinação do Vv de 4% e da média das máximas estabilidade, massa específica aparente e Vv de 4% foram utilizados os valores conforme apresentados na

Tabela 4.11.

Já para a obtenção dos valores de x_1 , x_2 , x_3 e x_4 , necessários para determinação dos teores centrais de Vv e RBV, primeiramente é necessária a execução e análise de um novo gráfico, que trata-se de uma interação conjunta entre o Vv, o RBV e o teor de ligante, para obtenção dos valores de Vv de 3 e 5% e RBV de 75 e 82%. Os valores são então ordenados crescentemente e denominados x_1 , x_2 , x_3 e x_4 . O teor ótimo calculado através desse método é a média entre x_2 e x_3 .

Os teores de ligante para Vv de 3% e RBV de 82% para o traço A30G100 são pontos fora do gráfico, conforme se observa na Figura 4.21, desta forma, esses valores foram obtidos através dos polinômios do quarto grau das curvas de Vv e RBV, de acordo com a Equação 4.1 e Equação 4.2, respectivamente.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Equação 4.1 – Polinômio do quarto grau da curva Vv – Traço A30G100.

$$y = 0,022x^4 - 1,2564x^3 + 17,523x^2 - 95,301x + 190,41, \text{ sendo que } R^2 = 1$$

Equação 4.2 – Polinômio do quarto grau da curva RBV – Traço A30G100.

$$y = 0,2856x^4 - 4,1381x^3 + 13,789x^2 + 44,302x - 171,71, \text{ sendo que } R^2 = 1$$

Para os demais traços, os teores de ligante para Vv de 3% e RBV de 82% foram obtidos por simples interpolação gráfica, conforme se observa na Figura 4.17, Figura 4.18, Figura 4.19 e Figura 4.20.

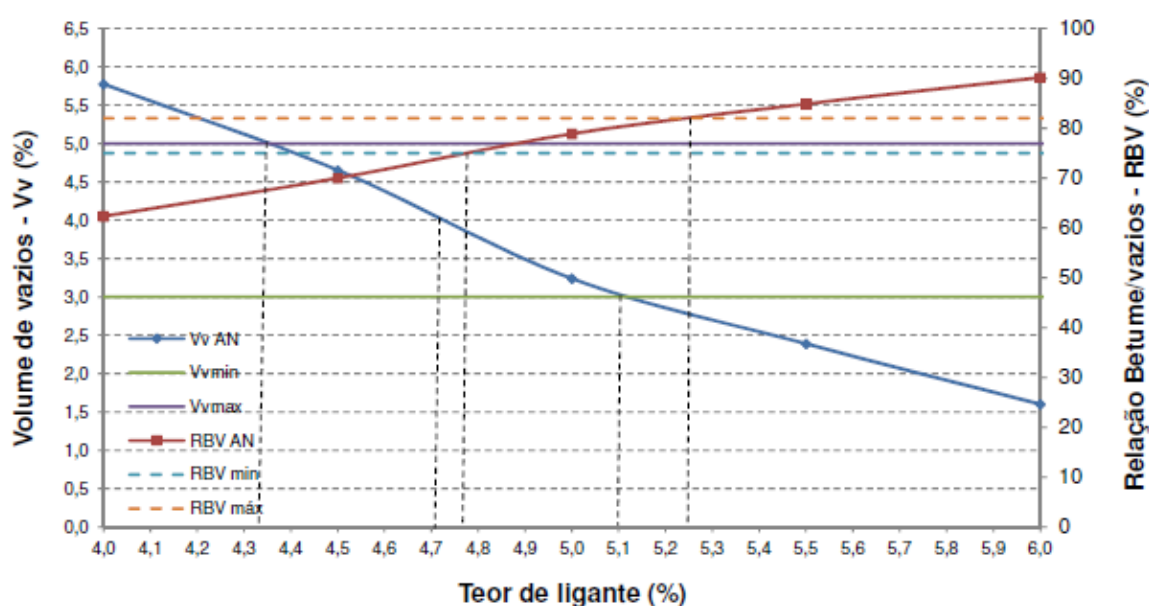


Figura 4.17 – Vv x RBV x teor de ligante – AN.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

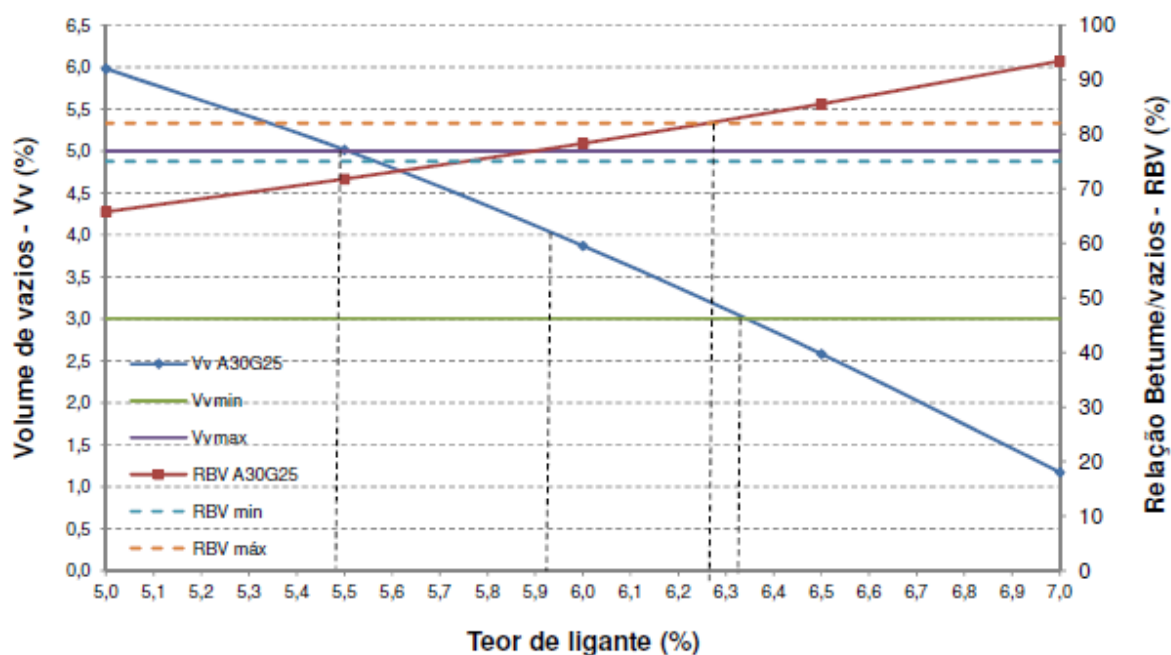


Figura 4.18 – Vv x RBV x teor de ligante – A30G25.

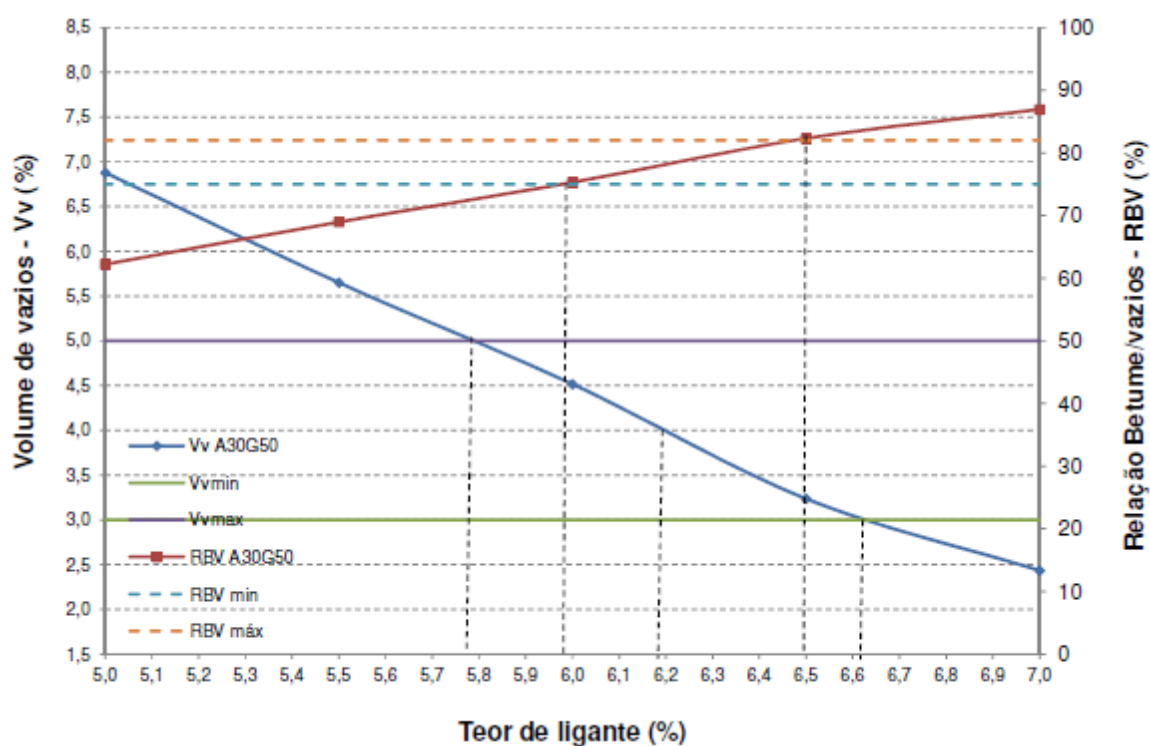


Figura 4.19 – Vv x RBV x teor de ligante – A30G50.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

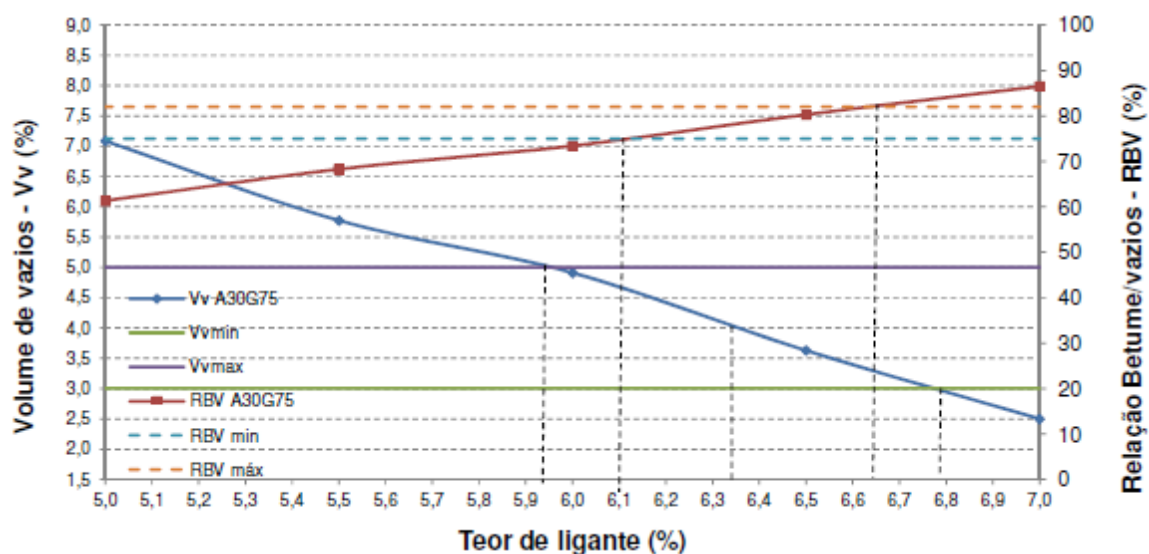


Figura 4.20 – Vv x RBV x teor de ligante – A30G75.

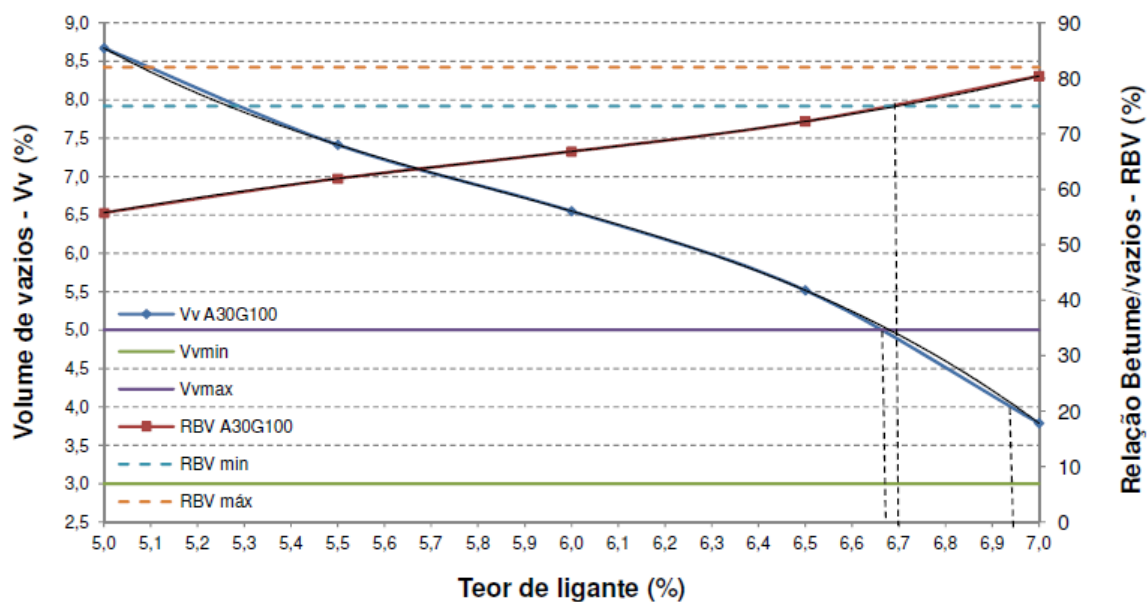


Figura 4.21 – Vv x RBV x teor de ligante – A30G100.

Tabela 4.11 – Teores ótimos de ligante pelos três diferentes métodos.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Teores ótimos de ligante	Traço AN	Traço A30G25	Traço A30G50	Traço A30G75	Traço A30G100
Vv de 4%					
Teor ótimo de ligante	4,74	5,92	6,19	6,34	6,94
Média das máximas: Estabilidade, Massa específica aparente e Vv 4%					
Máxima estabilidade	5,00	6,00	6,00	6,00	6,00
Máxima massa específica	6,00	7,00	7,00	7,00	7,00
Vv de 4%	4,74	5,92	6,19	6,34	6,94
Teor ótimo de ligante	5,25	6,31	6,40	6,45	6,65
Vv e RBV: teores centrais					
Vv 3%	5,10	6,32	6,61	6,79	7,16
Vv 5%	4,32	5,48	5,78	5,92	6,68
RBV 75%	4,78	5,73	5,99	6,10	6,70
RBV 82%	5,25	6,28	6,50	6,64	7,07
x1	4,32	5,48	5,78	5,92	6,68
x2	4,78	5,73	5,99	6,10	6,70
x3	5,10	6,28	6,50	6,64	7,07
x4	5,25	6,32	6,61	6,79	7,16
Teor ótimo de ligante	4,94	6,01	6,25	6,37	6,89

A Tabela 4.12 apresenta um resumo dos teores ótimos de ligante, calculados pelos três métodos já descritos.

Tabela 4.12 – Resumo dos teores ótimos de ligante pelos três diferentes métodos.

TEORES ÓTIMOS	TRAÇO AN.	TRAÇO A30G25	TRAÇO A30G50	TRAÇO A30G75	TRAÇO A30G100
Vv de 4%	4,74	5,92	6,19	6,34	6,94
Média das máximas: Estabilidade, Massa específica aparente e Vv de 4%	5,25	6,31	6,40	6,45	6,65
Vv e RBV: teores centrais	4,94	6,01	6,25	6,37	6,89

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na Tabela 4.13 verifica-se que para os teores ótimos calculados de acordo com o método de Vv de 4%, o RBV para o traço AN, igual a 74,46%, fica fora dos limites especificados pela DNIT-ES 031:2006, na qual RBV de estar entre 75% e 82%.

Tabela 4.13 – Vv e RBV para os teores ótimos calculados de acordo com o método de Vv de 4%.

Vv de 4%	TRAÇO AN.	TRAÇO A30G25	TRAÇO A30G50	TRAÇO A30G75	TRAÇO A30G100
	4,74	5,92	6,19	6,34	6,94
Vv	4,00%	4,00%	4,00%	4,00%	4,00%
RBV	74,46%*	77,23%	78,00%	77,99%	79,21%

* Destacados os valores fora dos parâmetros para a Faixa C do DNIT

Na Tabela 4.14 verifica-se que para os teores ótimos calculados de acordo com o método das médias das máximas estabilidade, massa específica aparente e Vv de 4%, o RBV para os traços AN e A30G25, iguais a 82,16% e 82,67%, respectivamente, ficam fora dos limites especificados pela DNIT-ES 031:2006, na qual RBV deve estar entre 75% e 82%, bem como o Vv para os traços AN e A30G100, iguais a 2,84% e 5,12%, respectivamente, ficam fora dos limites especificados pela DNIT-ES 031:2006, na qual Vv deve estar entre 3% e 5%.

Tabela 4.14 – Vv e RBV para os teores ótimos calculados de acordo com o método Média das máximas: Estabilidade, Massa específica aparente e Vv de 4%.

Média das máximas: Estabilidade, Massa específica aparente e Vv de 4%	TRAÇO AN.	TRAÇO A30G25	TRAÇO A30G50	TRAÇO A30G75	TRAÇO A30G100
	5,25	6,31	6,40	6,45	6,65
Vv	2,84%*	3,05%	3,67%	3,75%	5,12%*
RBV	82,16%*	82,67%*	80,91%	79,56%	74,23%

* Destacados os valores fora dos parâmetros para a Faixa C do DNIT

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na Tabela 4.15 verifica-se que para os teores ótimos calculados de acordo com o método dos teores centrais de Vv e RBV, todos os volumes de vazios e todas as relações betume/vazios se enquadram nos limites especificados pela DNIT-ES 031:2006, na qual RBV deve estar entre 75% e 82% e Vv entre 3% e 5%.

Tabela 4.15 – Vv e RBV para os teores ótimos calculados de acordo com o método Vv e RBV: teores centrais.

Vv e RBV: teores centrais	TRAÇO AN.	TRAÇO A30G25	TRAÇO A30G50	TRAÇO A30G75	TRAÇO A30G100
	4,94	6,01	6,25	6,37	6,89
Vv	3,47%	3,82%	4,05%	3,96%	4,29%
RBV	77,89%	78,39%	78,77%	78,43%	78,18%

Desta forma, através da comparação dos resultados de Vv e RBV para os teores ótimos calculados, considera-se que a metodologia que retornou resultados mais coerentes foi a de teores centrais de Vv e RBV, que é igual a 4,9% para o traço referência, AN, e varia de 6,0% a 6,9% para os traços A30G25, A30G50, A30G75 E A30G100.

Tabela 4.16 – Teores ótimos de ligante.

	TRAÇO AN	TRAÇO A30G25	TRAÇO A30G50	TRAÇO A30G75	TRAÇO A30G100
Vv e RBV: teores centrais	4,9	6,0	6,2	6,4	6,9

Conforme se observa na Tabela 2.25, apresentada na revisão bibliográfica desse trabalho, para o teor ótimo de ligante das misturas referências, são verificados teores entre 5,0%, Marinho (2011), e 5,7%, Ron *et al.* (2008).

Já para as misturas contendo agregados reciclados de concreto são verificados teores entre 5%, Marinho (2011), e 9,5%, Silva (2009).

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Desta forma, verifica-se que em comparação a pesquisas anteriores, os teores de ligante obtidos nesta pesquisa estão de acordo com o pesquisado.

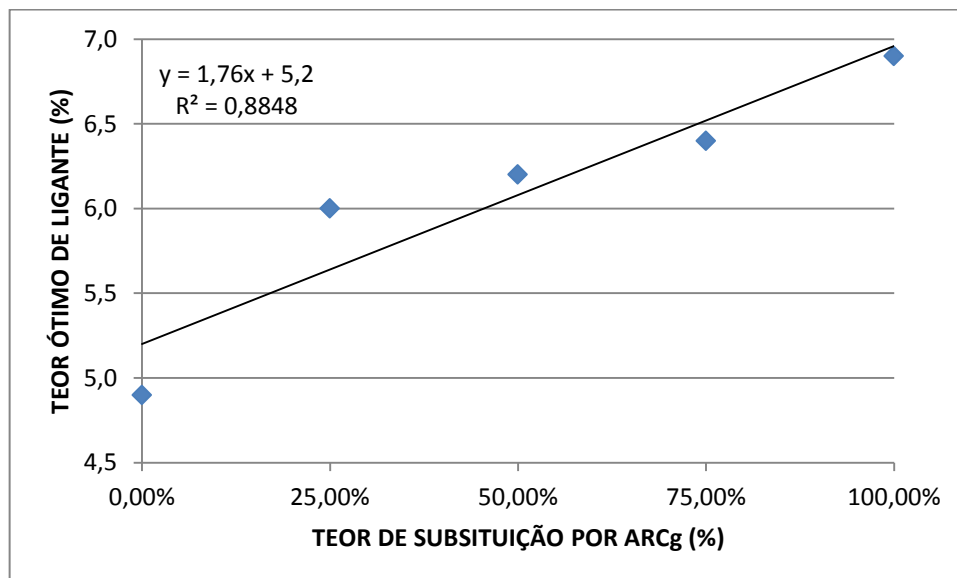


Figura 4.22 – Teor ótimo de ligante por teor de substituição por ARCg.

Conforme se verifica na Figura 4.22, existe uma tendência de aumento do teor ótimo de ligante em função do teor de substituição de agregado graúdo natural por ARCg, esse fato se deve à absorção e porosidade dos agregados reciclados que é maior que a porosidade dos agregados naturais.

4.5. Deformação Permanente (simulador de tráfego francês LCPC)

Todas as misturas utilizadas para a execução do ensaio de deformação permanente na mesa compactadora e simulador tipo LCPC foram elaboradas tomando-se como base os teores ótimos de ligante, apresentados na Tabela 4.16.

Conforme se verifica na Figura 4.23, o percentual de afundamento de trilha de roda para 30.000 ciclos para o traço AN é igual a 5,2%, atendendo, assim, as diretrizes francesas, que preveem percentual de afundamento de trilha de roda máximo de 10% para rodovias de baixo tráfego.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

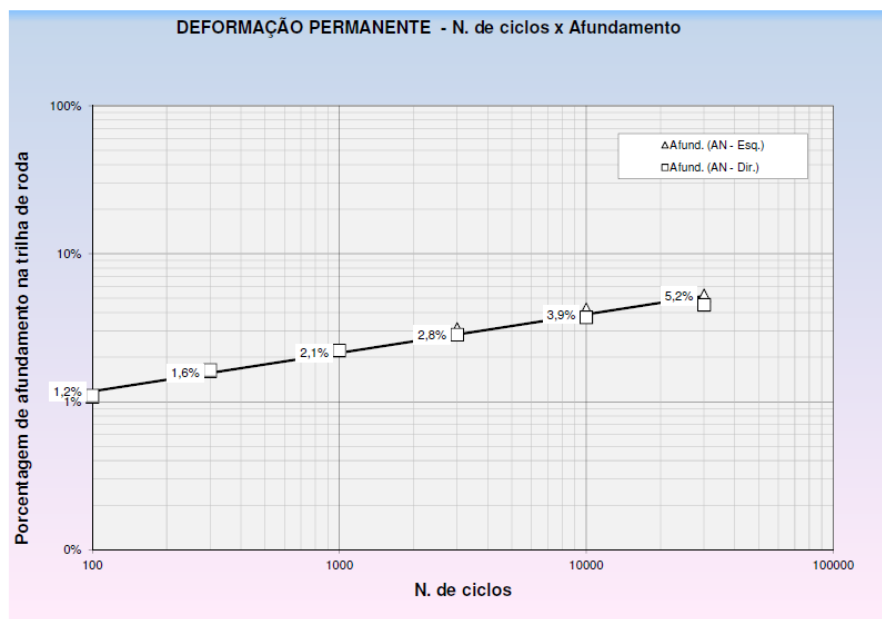


Figura 4.23 – Número de ciclos x afundamento – Traço AN.

Conforme se verifica na Figura 4.24, o percentual de afundamento de trilha de roda para 30.000 ciclos para o traço A30G25 é igual a 4,4%, atendendo, assim, as diretrizes francesas, que preveem percentual de afundamento de trilha de roda máximo de 10% para rodovias de baixo tráfego.

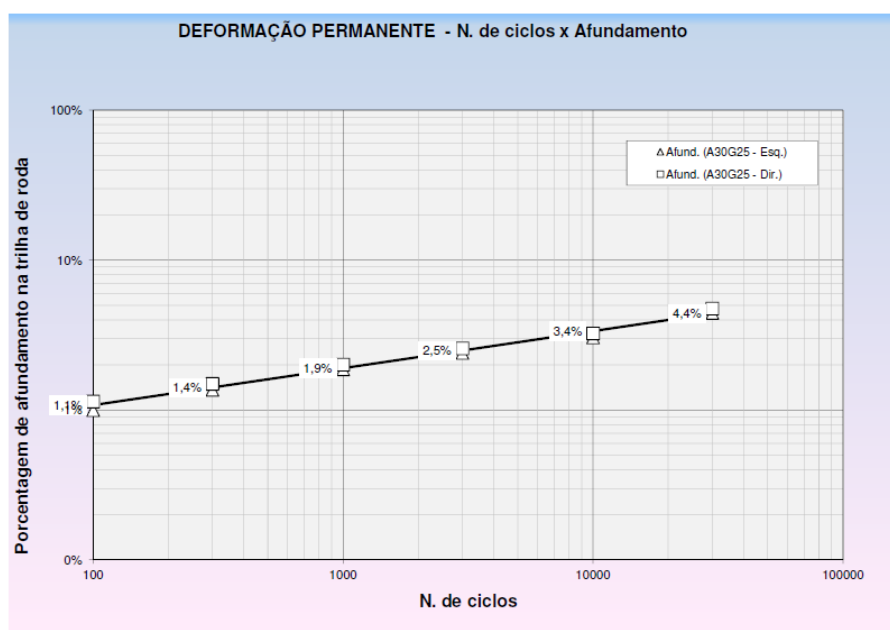


Figura 4.24 – Número de ciclos x afundamento – Traço A30G25.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Conforme se verifica na Figura 4.25, o percentual de afundamento de trilha de roda para 30.000 ciclos para o traço A30G50 é igual a 4,7%, atendendo, assim, as diretrizes francesas, que preveem percentual de afundamento de trilha de roda máximo de 10% para rodovias de baixo tráfego.

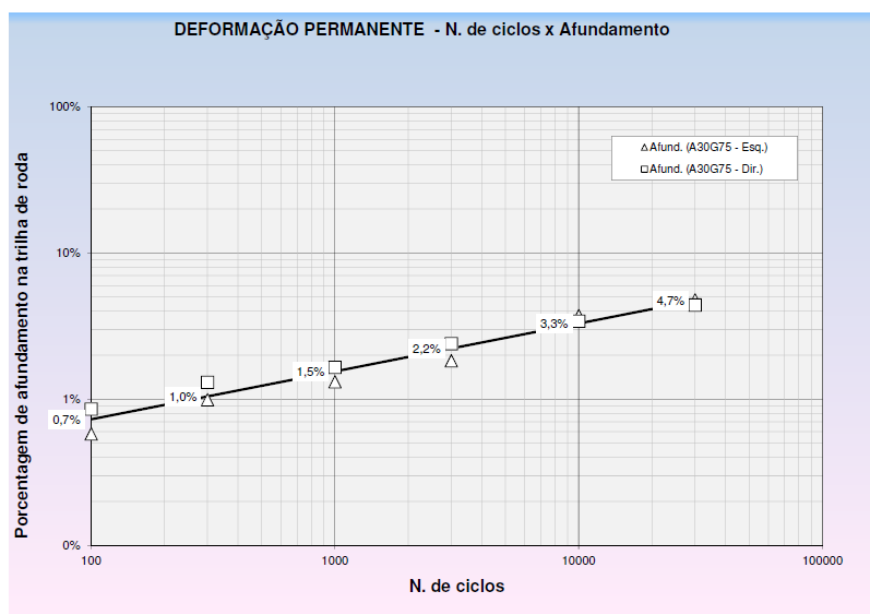


Figura 4.25 – Número de ciclos x afundamento – Traço A30G50.

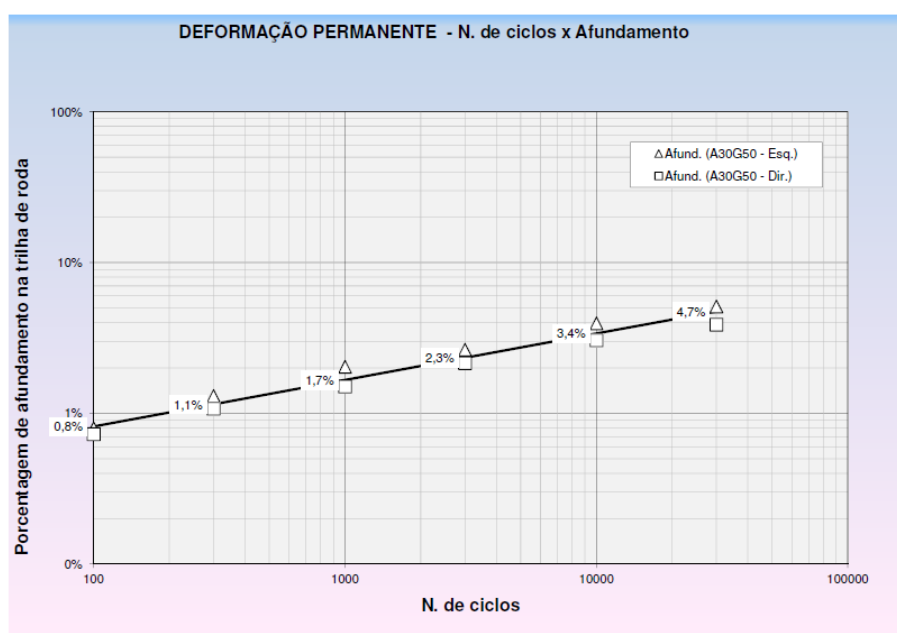


Figura 4.26 – Número de ciclos x afundamento – Traço A30G75.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Conforme se verifica na Figura 4.26, o percentual de afundamento de trilha de roda para 30.000 ciclos para o traço A30G75 é igual a 4,7%, atendendo, assim, as diretrizes francesas, que preveem percentual de afundamento de trilha de roda máximo de 10% para rodovias de baixo tráfego.

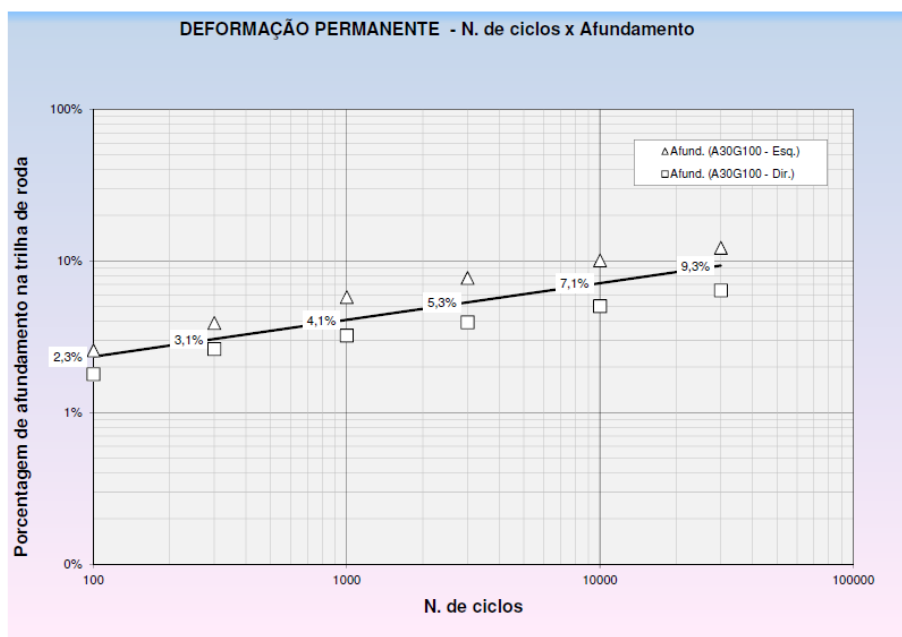


Figura 4.27 – Número de ciclos x afundamento – Traço A30G100.

Conforme se verifica na Figura 4.27, o percentual de afundamento de trilha de roda para 30.000 ciclos para o traço A30G100 é igual a 9,3%, atendendo, assim, as diretrizes francesas, que preveem percentual de afundamento de trilha de roda máximo de 10% para rodovias de baixo tráfego.

Conforme se verifica na Tabela 4.17 e na Figura 4.28, os percentuais de afundamento de trilha de roda para 30.000 ciclos para os traços A30G25, A30G50 e A30G75 apresentaram menor afundamento do trilho de roda que o traço AN.

Apesar das diretrizes francesas limitarem o valor obtido no simulador de tráfego em 10% para camadas de concreto asfáltico utilizadas como revestimentos, Moura (2010) verificou que a deformação permanente limitada em 5% pode reduzir as possíveis ocorrências de deformações permanentes de revestimento asfálticos

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

sujeitos a tráfego muito pesado. Desta forma, verifica-se, que a deformação permanente dos traços A30G25, A30G50 e A30G75 ficou abaixo de 5%. Ressalta-se, ainda, que o autor havia constatado que a utilização do ligante CAP 50/70 havia se mostrado inadequado para tráfego pesado e lento. Porém, conforme se observa nos resultados dessa pesquisa, o afundamento do trilho de roda para o traço AN se mostrou acima dos 5%, porém a substituição de parte dos agregados graúdos naturais do CBUQ por até 75% de agregado graúdo reciclado de concreto apresentam uma melhoria nessa propriedade do CBUQ, podendo indicar, inclusive, a viabilidade de utilização do mesmo não apenas em via de tráfego baixo e leve, objetivo desta pesquisa, mas também para vias de tráfego pesado e lento.

Quanto ao traço A30G100, o mesmo se mostrou dentro do especificado pelas diretrizes francesas, porém muito acima dos valores encontrados para os demais traços.

Tabela 4.17 – Afundamento do trilho de roda x número de ciclos.

Porcentagem de afundamento do trilho de roda (Deformação permanente - LCPC)	Número de Ciclos					
	100	300	1000	3000	10000	30000
AN	1,2%	1,6%	2,1%	2,8%	3,9%	5,2%
A30G25	1,1%	1,4%	1,9%	2,5%	3,4%	4,4%
A30G50	0,8%	1,1%	1,7%	2,3%	3,4%	4,7%
A30G75	0,7%	1,0%	1,5%	2,2%	3,3%	4,7%
A30G100	2,3%	3,1%	4,1%	5,3%	7,1%	9,3%

Conforme se verificou na revisão bibliográfica realizada, o único pesquisador que realizou o ensaio de deformação permanente na mesa compactadora e simulador tipo LCPC, mesmo utilizado nessa pesquisa, foi Silva (2009).

Ao contrário do que se verificou nesse trabalho, Silva (2009) obteve valores muito elevados para deformação permanente. Conforme já comentado, Silva (2009) estudou a substituição integral, tanto da fração graúda, quanto da fração miúda, de agregados naturais por ARC. Na Tabela 4.18 e na Figura 4.29 são apresentados os

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

valores de deformação permanente obtidos para as misturas estudadas por Silva (2009) em comparação com o traço A30G100 estudado nessa pesquisa, que é o traço com maior percentual de substituição de agregado natural por ARCg. Observa-se também que os teores de ligante utilizados por Silva (2009) variam entre 10% e 10,5%.

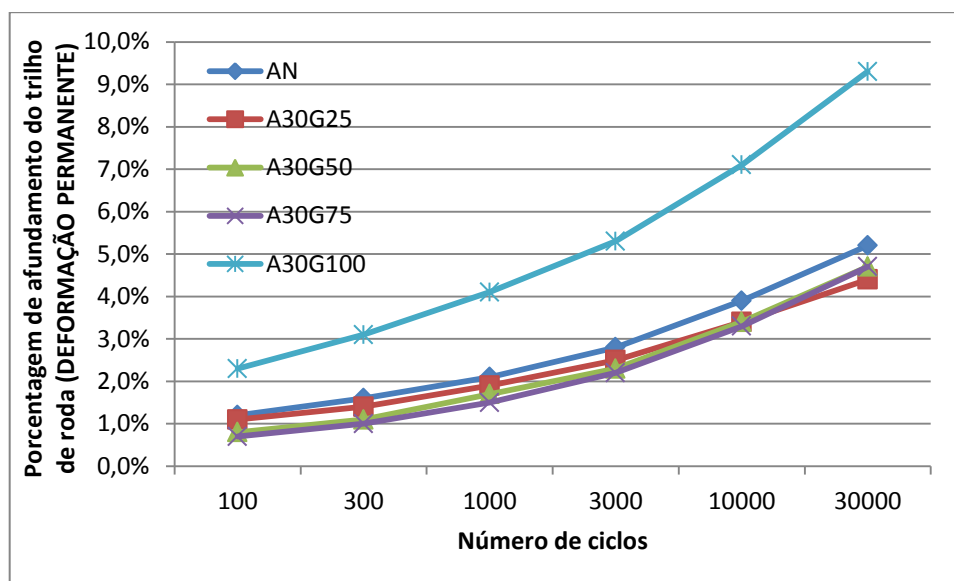


Figura 4.28 – Afundamento do trilho de roda x número de ciclos.

Tabela 4.18 – Afundamento do trilho de roda x número de ciclos – comparação entre o trabalho de Silva (2009) e o traço A30G100.

Porcentagem de afundamento do trilho de roda (Deformação permanente - LCPC)	TEOR DE LIGANTE	Número de Ciclos					
		100	300	1000	3000	10000	30000
Mistura I Faixa C - CAP 50/70	10,50%	1,4%	2,4%	4,1%	6,9%	12,2%	16,8%
Mistura II Faixa B - CAP 50/70	10%	1,7%	3,5%	7,8%	16,3%	21,7%	
Mistura III Faixa C - CAP 35/45	10,50%	1,3%	1,9%	2,9%	4,4%	6,7%	9,9%
Mistura IV Faixa B - CAP 30/45	10%	1,1%	1,8%	3,1%	5,0%	8,4%	13,6%
A30G100	6,90%	2,3%	3,1%	4,1%	5,3%	7,1%	9,3%

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

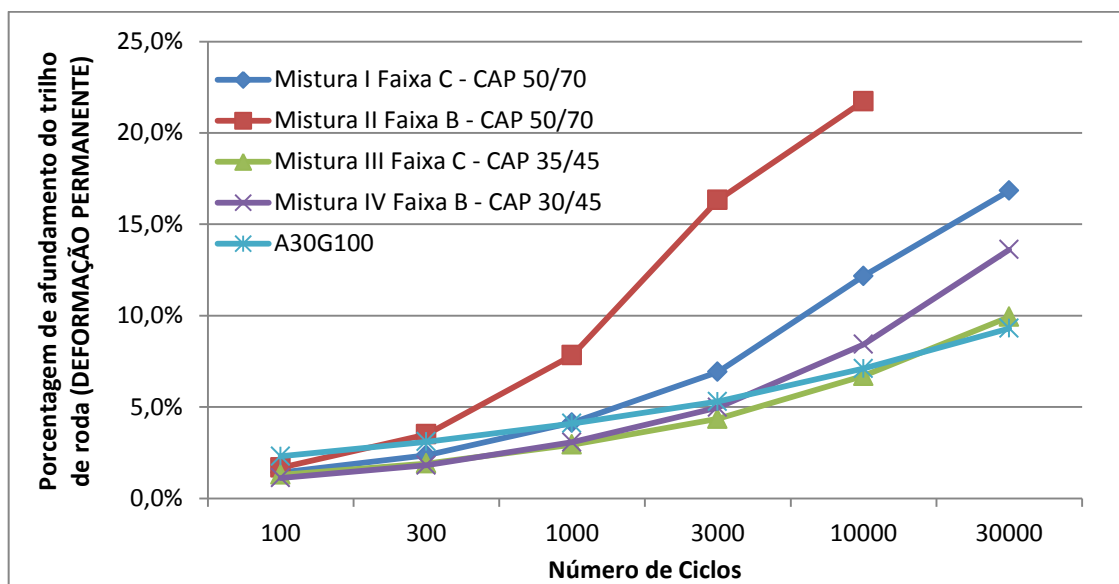


Figura 4.29 – Afundamento do trilho de roda x número de ciclos – comparação entre o trabalho de Silva (2009) e o traço A30G100.

O traço A30G100 ficou muito próximo aos valores da mistura enquadrada na Faixa C, executada com CAP 35/45 e teor de ligante igual a 10,50%, estudada por Silva (2009), sendo essa a pior mistura verificada quanto à deformação permanente nesse trabalho.

Os pesquisadores Mills-Beale e You (2010) indicam em sua pesquisa que uma substituição de agregado natural por agregado reciclado em percentuais maiores que 75% pode representar, de fato, um problema do ponto de vista da deformação permanente.

Limitando o percentual de substituição de agregado natural por ARCg em 75%, é possível que se garanta uma boa capacidade de resistência do pavimento quanto à deformação permanente, corroborando com o verificado com Mills-Beale e You (2010).

Porém, apesar de a mistura com percentual de substituição de 100% de agregado natural por ARCg ter apresentado elevada deformação permanente em comparação com os demais percentuais de substituição estudados, essa situação pode ter ocorrido pelo maior teor ótimo de ligante encontrado para essa mistura,

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

conforme se verifica nos resultados apresentados na Tabela 4.16, pois, ao mesmo tempo que a mistura exige maior percentual de ligante devido à maior absorção, maior quanto maior o percentual de substituição por ARCg, essa situação implica em maior deformação permanente, ocasionando um impasse que deve ser melhor estudado em estudos futuros.

4.6. Resistência da mistura asfáltica compactada ao dano por umidade – Ensaio Lottman

Os resultados para o ensaio Lottman, cujos corpos de provas foram rompidos em 17 de maio de 2013, tanto para o traço AN, quanto para o traço A30G100, são apresentados na Tabela 4.19.

Tabela 4.19 – Resultados obtidos para o ensaio Lottman.

	Ensaio Lottman	
	RRT	RRT Mínimo previsto na norma AASHTO T-283:1989
Traço AN	13,3%	70%
Traço A30G100	9,3%	70%

Conforme se observa, os valores de RRT obtidos para o traço AN, igual a 13,3%, e para o traço A30G100, igual a 9,3%, ficaram muito abaixo do mínimo previsto pela norma AASHTO T-283:1989, igual a 70%, e indicam falta de adesividade das duas misturas.

Na Figura 4.30 é apresentado um corpo de prova saturado do ensaio Lottman rompido onde é possível perceber o ligante aderido nos agregados graúdos, porém não aderidos nos agregados miúdos, desta forma verifica-se que a causa para os resultados obtidos provém dos agregados miúdos.

A principal suspeita para os resultados obtidos é que tenha ocorrido contaminação dos agregados miúdos tipo pó de pedra.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS



Figura 4.30 – Detalhe de corpo de prova saturado do ensaio Lottman rompido – agregados miúdos não aderidos.

Visando uma melhor compreensão do ocorrido, o ensaio foi repetido, com a utilização de um novo lote de agregados miúdos tipo pó de pedra, de mesma origem.

Os resultados para a repetição do ensaio Lottman, cujos corpos de provas foram rompidos em 17 de setembro de 2013, tanto para o traço AN, quanto para o traço A30G100, são apresentados na Tabela 4.20.

Tabela 4.20 – Resultados obtidos para a repetição do ensaio Lottman.

	Repetição - Ensaio Lottman	
	RRT	RRT Mínimo previsto na norma AASHTO T-283:1989
Traço AN	41,3%	70%
Traço A30G100	64,2%	70%

Conforme se observa, os valores de RRT obtidos para o traço AN, igual a 41,3%, e para o traço A30G100, igual a 64,2%, ainda ficaram abaixo do mínimo previsto pela norma AASHTO T-283:1989, igual a 70%.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na Figura 4.31, Figura 4.32, Figura 4.33 e Figura 4.34 verificam-se um corpo de prova seco e um corpo de prova saturado do ensaio Lottman rompido, para cada traço estudado.



Figura 4.31 – Detalhe de corpo de prova seco do ensaio Lottman rompido, traço A30G100.



Figura 4.32 – Detalhe de corpo de prova seco do ensaio Lottman rompido, traço AN.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS



Figura 4.33 – Detalhe de corpo de prova saturado do ensaio Lottman rompido, traço A30G100.



Figura 4.34 – Detalhe de corpo de prova saturado do ensaio Lottman rompido, traço AN.

É possível verificar, na Figura 3.10, que o traço das misturas estudadas está encaixado entre o mínimo e máximo previsto para a Faixa C, de acordo com as especificações do DNIT, porém, da peneira nº 16 até o fundo, correspondendo a uma fração menor que 1,2mm, o traço está muito próximo do mínimo previsto.

O resultado obtido para o traço A30G100 é superior ao resultado obtido para o traço AN, o que indica que, apesar das duas misturas terem adesividade insuficiente, em decorrência aos resultados de RRT inferiores ao previsto em norma, devido à própria composição das misturas que possui poucos finos com

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

granulometria menor que 1,2mm, a adesividade da mistura com agregado graúdo reciclado de concreto é melhor do que a adesividade da mistura com agregado natural, ou seja, o agregado graúdo reciclado de concreto melhorou a adesividade da mistura.

4.7. Análise de custo das misturas

Para a análise de custo das misturas foram obtidos os custos dos agregados naturais, nas frações brita 1, pedrisco e pó de pedra, na pedreira Raphael F. Greca e Filhos Ltda., localizada em Colombo, estado do Paraná, os custos dos agregados reciclados de concreto, nas frações brita 1 e pedrisco, na USIPAR, Usina de Recicláveis Sólidos Paraná S/A, localizada em Almirante Tamandaré, estado do Paraná, e o custo do CAP 50/70 na CBB Asfaltos, localizada em Curitiba, estado do Paraná. Todos os custos foram obtidos no dia 08 de maio deste ano.

Foi solicitado, tanto à pedreira Raphael F. Greca e Filhos Ltda., quanto à USIPAR, que considerassem o valor do transporte para o centro de Curitiba, estado do Paraná.

Tabela 4.21 – Massa unitária dos agregados miúdos e reciclados (adaptado pela autora de CARNEIRO et al., 2001).

	Massa Unitária (ABNT NBR 7251:1982) (g/cm ³)
Agregado reciclado graúdo	1,07
Agregado reciclado miúdo	1,30

Tanto a pedreira Raphael F. Greca e Filhos Ltda. quanto a USIPAR forneceram os custos dos agregados por m³. A pedreira Raphael F. Greca e Filhos Ltda. forneceu a massa unitária, em g/cm³, que equivale também a ton/m³, conforme é possível observar na Tabela 4.22. Já a USIPAR não tinha o valor da massa unitária dos agregados para fornecer. Desta forma, verificou-se na revisão bibliográfica realizada que apenas a pesquisa de Carneiro et al. (2001) contempla o

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

valor de massa unitária do agregado reciclado, de forma que foi utilizado o valor de massa unitária para agregado reciclado gráudo verificado por esses pesquisadores para os cálculos necessários, conforme Tabela 4.21, visando a análise de custos das misturas.

Na Tabela 4.22, Tabela 4.23 e Tabela 4.24 são apresentados, portanto, os custos obtidos dos agregados, dos transportes dos agregados e do CAP 50/70.

Tabela 4.22 – Custos dos agregados naturais, obtidos pela autora da pedreira Raphael F. Greca, em Curitiba/PR.

AN	Material (R\$/m³)	Massa unitária (g/cm³ ou t/m³)	Material (R\$/t)	Transporte (R\$/t)
Brita 1	R\$ 37,00	1,38	R\$ 26,81	R\$ 19,51
Pedrisco	R\$ 36,00	1,35	R\$ 26,67	R\$ 19,94
Pó de pedra	R\$ 54,00	1,50	R\$ 36,00	R\$ 17,95

Tabela 4.23 – Custos dos agregados reciclados de concreto, obtidos pela autora da USIPAR, em Curitiba/PR.

A30	Material (R\$/m³)	Massa unitária (g/cm³ ou t/m³)	Material (R\$/t)	Transporte (R\$/t)
Brita 1	R\$ 22,00	1,07	R\$ 20,56	R\$ 10,74
Pedrisco	R\$ 20,00	1,07	R\$ 18,69	R\$ 11,21

Tabela 4.24 – Custo do CAP 50/70, obtido pela autora da CBB Asfaltos, em Curitiba/PR.

CAP 50/70	Material (R\$/t)
CBB Asfaltos	R\$ 1.080,00

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os custos de equipamento e mão-de-obra foram obtidos do Sistema de Custos Unitários do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte, para o estado do Paraná, com valores de Novembro de 2012, conforme o custo unitário de referência número 5 S 02 540 01, para concreto betuminoso usinado a quente – capa de rolamento, apresentado na Tabela 4.25.

Tabela 4.25 – Custo unitário de referência - 5 S 02 540 01 - Concreto betuminoso usinado a quente - capa de rolamento (adaptado pela autora de DNIT, 2012).

5 S 02 540 01 - Concreto betuminoso usinado a quente - capa de rolamento							
Produção da equipe: 75,0 t							
Equipamento		Quantida de	Utilização		Custo Operacional		Custo Horário
			Operativ a	Improduti va	Operativo	Improdutiv o	
E007	Trator Agrícola - (74 kW)	1	0,24	0,76	R\$ 66,84	R\$ 17,27	R\$ 29,17
E102	Rolo Compactador - Tandem vibrat. autoprop. 10,2 t (82 kW)	1	0,56	0,44	R\$ 113,21	R\$ 17,27	R\$ 71,00
E105	Rolo Compactador - de pneus autoprop. 25 t (98 kW)	2	0,29	0,71	R\$ 112,47	R\$ 17,27	R\$ 89,76
E107	Vassoura Mecânica - rebocável	1	0,24	0,76	R\$ 3,83	R\$ -	R\$ 0,92
E149	Vibro-acabadora de Asfalto - sobre esteiras (82 kW)	1	0,81	0,19	R\$ 143,16	R\$ 23,67	R\$ 120,46
E404	Caminhão Basculante - 10 m³ - 15 t (191 kW)	1,53	1	0	R\$ 129,01	R\$ 20,47	R\$ 197,39
Custo Horário de Equipamentos							R\$ 508,71
Mão-de-Obra		Quantida de			Salário-Hora		Custo Horário
T511	Encarregado de pavimentação	1			R\$ 44,78		R\$ 44,79
T701	Servente	8			R\$ 9,02		R\$ 72,17
Custo Horário da Mão-de-Obra							R\$ 116,96
Adicional Mão-de-Obra - Ferramentas (15,51%):							R\$ 18,14
Custo Horário de Execução							R\$ 643,81
Custo Unitário de Execução							R\$ 8,58

Desta forma, considerando os teores ótimos de ligante e a composição de agregados da mistura, foram calculados os custos para execução da camada de

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

rolamento em concreto betuminoso usinado a quente para as cinco misturas estudadas, conforme consta na Tabela 4.26, em reais por toneladas.

Tabela 4.26 – Custo das misturas.

Material	Custo dos materiais (R\$/ton)	Custo do transporte (R\$/ton)	AN	A30G25 25% de substituição	A30G50 50% de substituição	A30G75 75% de substituição	A30G100 100% de substituição
AN - Brita 1	R\$ 26,81	R\$ 19,51	19,0%	14,1%	9,4%	4,7%	0,0%
A30 - Brita 1	R\$ 20,56	R\$ 10,74	0,0%	4,7%	9,4%	14,0%	18,6%
AN - Pedrisco	R\$ 26,67	R\$ 19,94	20,9%	15,5%	10,3%	5,1%	0,0%
A30 - Pedrisco	R\$ 18,69	R\$ 11,21	0,0%	5,2%	10,3%	15,4%	20,5%
Pó de pedra	R\$ 36,00	R\$ 17,95	55,2%	54,5%	54,4%	54,3%	54,0%
CAP 50/70	R\$ 1.080,00	R\$ -	4,9%	6,0%	6,2%	6,4%	6,9%
Custo dos materiais (R\$/t) (1)			R\$ 101,24	R\$ 110,99	R\$ 111,49	R\$ 111,99	R\$ 115,60
Custo unitário de execução (R\$/t)			R\$ 8,58	R\$ 8,58	R\$ 8,58	R\$ 8,58	R\$ 8,58
Custo total (R\$/t)			R\$ 109,82	R\$ 119,57	R\$ 120,07	R\$ 120,57	R\$ 124,18
Acréscimo (%) (2)			-	8,2%	8,5%	8,9%	11,6%

(1) custo dos materiais, em R\$/t, considerando o custo do transporte, também em R\$/t

(2) acréscimo no custo, em percentual, em comparação ao custo da mistura AN

Conforme se observa na Tabela 4.27, os custos das misturas com agregados reciclados de concreto chegam a ser 8,2% a 11,6% mais elevados que a mistura contendo apenas agregado natural.

Esse fato se deve ao maior consumo de ligante, que, conforme já verificado, aumenta em função do acréscimo de ARCg à mistura, devido à maior absorção e porosidade dos ARCg.

De acordo com as pesquisas verificadas, foi possível observar que a única que apresentou um cálculo para o custo de concreto betuminoso usinado a quente com agregado natural substituído por agregado reciclado de concreto é o trabalho de Guimarães e Ribeiro (2005), que verificaram que a mistura betuminosa tipo CBUQ realizada com o resíduo de concreto, apesar de ser tecnicamente viável, era

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

cerca de 33,6% mais cara que a mistura betuminosa usinada com agregado de Goiânia.

Possivelmente a diferença entre percentuais encontradas nessa pesquisa e na pesquisa de Guimarães e Ribeiro (2005) se deu devido aos fatos comparativos apresentados na Tabela 4.27.

Tabela 4.27 – Comparação da análise de custos dessa pesquisa com a análise de custos da pesquisa de Guimarães e Ribeiro (2005).

Nessa pesquisa	Na pesquisa de Guimarães e Ribeiro (2005)
O CAP utilizado é do tipo CAP 50/70	O CAP utilizado é do tipo CAP 20
Foram substituídos apenas agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados de concreto	Foram substituídos tanto os agregados graúdos, quanto os miúdos, naturais por agregados reciclados de concreto
Foram estudados diversos teores de substituição (0%, 25%, 50%, 75% e 100%)	Foram estudados apenas dois teores de substituição (0% e 100%)
Os teores ótimos calculados são iguais a 4,9%, 6,0%, 6,2%, 6,4% e 6,9%, respectivamente	Os teores ótimos calculados são iguais a 5,5% e 8,5%, respectivamente
Foram considerados os custos de transporte dos agregados, que para os agregados reciclados de concreto chegaram a custar 44,95% a menos que o transporte dos agregados naturais	Não foram considerados os custos de transporte dos agregados
Foram considerados os custos de equipamentos e mão-de-obra	Não foram considerados os custos de equipamentos e mão-de-obra
O custo orçado do CAP na região de Curitiba é na faixa de R\$ 1.080,00 por tonelada	O custo médio do CAP na região de Goiânia é na faixa de R\$ 1.300,00 por tonelada

Um fato muito bem observado por Guimarães e Ribeiro (2005), é que, além dos custos considerados, existe também o custo de remoção de resíduos de construção e demolição dispostos de maneira irregular pela cidade. De acordo com os pesquisadores, em 2005 a Prefeitura Municipal de Goiânia chegou a gastar dois

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

milhões de reais por mês com a remoção de RCD dispostos de forma irregular pela cidade.

Não foram encontrados custos da Prefeitura Municipal de Curitiba com remoção de RCD dispostos de forma irregular pela cidade, porém, considerando-se os dois milhões de reais por mês, verificados por Guimarães e Ribeiro (2005), seria viabilizada a execução de mais de 16.000 toneladas de CBUQ para camadas de rolamento, com reaproveitamento de ARCg, por mês, conforme se verifica na Tabela 4.28.

Tabela 4.28 – Toneladas de camada de CBUQ para camadas de rolamento que seriam executadas com dois milhões de reais.

	A30G25 25% de substituição	A30G50 50% de substituição	A30G75 75% de substituição	A30G100 100% de substituição
Toneladas de CBUQ para camadas de rolamento	16726,49	16657,50	16588,16	16105,12

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões

É consenso no meio acadêmico e os resultados dessa pesquisa corroboram para confirmar que a absorção dos agregados reciclados de concreto é maior que a absorção dos agregados naturais, enquanto que para os agregados graúdos naturais a absorção ficou entre 0,5% e 0,8%, para os agregados graúdos reciclados de concreto variou entre 4,3% e 9,1%.

Consequentemente à maior absorção, têm-se maior porosidade e menor massa específica aparente, conforme verificou-se para os agregados reciclados de concreto, que apresentaram menor massa específica aparente quando comparados aos agregados naturais, sendo que para os agregados graúdos naturais a massa específica aparente ficou entre 2,629g/cm³ e 2,720g/cm³, e para os agregados graúdos reciclados de concreto variou entre 2,119g/cm³ e 2,419g/cm³.

Verificou-se uma tendência de aumento do percentual de desgaste por abrasão Los Angeles em função da absorção dos agregados e, consequentemente, da porosidade dos grãos. Observou-se também uma tendência de redução do desgaste por abrasão Los Angeles quanto maior a resistência do concreto que originou o ARCg.

Em comparação a pesquisas anteriores, os valores de absorção, desgaste por abrasão Los Angeles e massa específica aparente obtidos nesta pesquisa estão coerentes (MARINHO, 2011; SILVA, 2009; LEITE, 2007).

A metodologia de dosagem utilizada foi a mesma para todas as misturas estudadas, a dosagem Marshall, e seguiu os passos contidos no método de ensaio DNER-ME 043:1995.

Foi executado também o ensaio para determinação da densidade máxima medida, ensaio RICE, seguindo o que determina a norma ABNT NBR 15619:2012.

Nos parâmetros volumétricos e mecânicos, obtidos através da dosagem Marshall, verificaram-se influências do teor de ligante, da porosidade, da massa específica dos grãos de agregado reciclado de concreto e do percentual de substituição de agregado natural por agregado graúdo reciclado de concreto.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi possível constatar que todas as misturas estudadas se enquadraram no percentual mínimo de VAM previsto em norma, igual a 15%.

Os valores obtidos para teores ótimo de ligante das misturas demonstraram que, a estrutura mais porosa, encontrada nos agregados reciclados de concreto, acarretou em mais vazios e uma maior área de superfície, requisitando assim maior porcentagem de ligante e explicando o fator de variação do teor de ligante em função do percentual de substituição de agregado natural por agregado reciclado de concreto. Porém, verificou-se que, por mais que o teor de ligante tenha aumentado com o percentual de substituição, os resultados obtidos não foram tão elevados quanto em algumas pesquisas verificadas (RON *et al.*, 2008; SILVA 2009).

No ensaio de deformação permanente na mesa compactadora e simulador tipo LCPC foram seguidos os procedimentos previstos nas normas NF P98-250-2:1997 E NF P98-253-1:1993 para moldagem dos corpos de prova e realização do ensaio.

Os resultados obtidos quanto à deformação permanente indicaram uma melhora nos resultados quando utilizados até 75% de agregado reciclado de concreto em substituição ao agregado natural, corroborando com o verificado pelos pesquisadores Mills-Beale e You (2010), que perceberam que uma substituição de agregado natural por agregado reciclado em percentuais maiores que 75% pode representar, de fato, um problema do ponto de vista da deformação permanente.

Apesar de a mistura com percentual de substituição de 100% de agregado natural por ARCg ter apresentado elevada deformação permanente, igual a 9,3%, em comparação com os demais percentuais de substituição estudados, entre 4,4% e 5,2%, essa situação pode ter ocorrido pelo maior teor ótimo de ligante encontrado para essa mistura, igual a 6,9%, pois, ao mesmo tempo que a mistura exige maior percentual de ligante devido à maior absorção, maior quanto maior o percentual de substituição por ARCg, essa situação implica em maior deformação permanente, ocasionando um impasse que deve ser melhor estudado em estudos futuros.

Conforme já mencionado, o excesso de ligante causa fluência excessiva, escorregamentos de massa, exsudação e deformação permanente (BERNUCCI *et al.*, 2006). Vasconcelos (2003) ainda complementa que um revestimento pode

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

apresentar exsudação e deformação permanente caso haja 0,5% de excesso em relação ao valor de ótimo de ligante.

Quanto ao ensaio Lottman, foi possível concluir que a substituição de agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados de concreto implicou em melhoras na adesividade da mistura, sendo que para o traço AN o valor de RRT obtido foi igual a 41,3% e para o traço A30G100, com 100% de substituição de agregado natural por agregado reciclado de concreto, 64,3%. Porém ambos os resultados obtidos são inferiores ao mínimo previsto pela norma AASHTO T-283:1989, igual a 70%, em função de baixo teores de fino com granulometria menor que 1,2mm na mistura.

A análise de custos apresentou-se otimista com relação às análises de custos já verificada em trabalhos anteriores. Verificou-se 8,9% de acréscimo de custo para execução de misturas com até 75% de substituição de agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado de concreto. Foram levados em consideração também os gastos governamentais com remoção e destinação correta de resíduos, consideravelmente representativos para os cálculos.

Exceto para o ensaio Lottman, todas as propriedades analisadas de todos os agregados graúdos reciclados de concreto (desgaste máximo de abrasão igual a 50%), bem como para todas as misturas (estabilidade mínima de 500kgf, volumes de vazios entre 3% e 5%, relação betume vazios entre 75% e 82% e deformação permanente menor que 10%), se enquadraram nas especificações de serviços e normas técnicas previstas. Fato este que indica possível viabilidade técnica para execução de concretos asfálticos em vias de tráfego baixo, podendo, desta maneira, contribuir com o aproveitamento desses resíduos e minimizar os problemas relacionados à disposição irregular dos mesmos.

Conclui-se que o uso dos agregados reciclados de concreto não apenas nas camadas de base, sub-base e reforço dos pavimentos, mas também em misturas asfálticas, poderá contribuir para aumentar significativamente o consumo dos agregados reciclados gerados em larga escala pela construção civil.

Porém, como se trata de um material em estudo e sem normas específicas, é precipitado afirmar que os resultados sobre seu desempenho são conclusivos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sugerem-se novas pesquisas para complementação dos estudos acerca da utilização de agregados graúdos reciclados de concreto em concreto betuminoso usinado a quente e, caso os resultados dos novos estudos permaneçam satisfatórios, é uma alternativa que pode se concretizar para reduzir os prejuízos decorrentes do consumo desordenado de agregados naturais, o gasto de energia despendido e minimização do excesso de resíduos gerados pela cadeia produtiva da construção civil, bem como suas disposições irregulares.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Sugere-se para trabalhos futuros:

- Executar o ensaio de sedimentação prescrito na norma técnica ABNT NBR 7181:1984 para complementar a análise granulométrica da fração miúda menor que 0,075mm e avaliar o efeito dessas partículas do CBUQ com agregado graúdo reciclado de concreto;
- Avaliar se há alteração na absorção dos agregados graúdos reciclados de concreto nas misturas asfálticas após banho em calda de cal;
- Avaliar os percentuais de misturas de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% de substituição de agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado de concreto, quanto ao ensaio de dano por umidade induzida (ensaio Lottman), com composições granulométricas que proporcionem mais adesividade à mistura, para verificar a influência do ARCg sobre o CBUQ quanto à adesividade;
- Executar misturas asfálticas com cal na fração miúda, que além de melhorar a adesividade agregado-ligante e enrijecer o ligante asfáltico, ocasiona o retardamento de trincas e altera favoravelmente a cinética da oxidação e interação com produtos da oxidação, de modo a reduzir os efeitos deletérios verificados para as misturas;
- Verificar a possibilidade de substituição de agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado de concreto em misturas mais abertas e usinadas a frio com emulsão, analisando os custos desse novo tipo de mistura, pois essa pode ser uma forma de viabilizar a desoneração da mistura a quente;

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Executar pista teste com a substituição em diversos teores de agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado de concreto e monitorar os resultados, a fim de comparar os resultados laboratoriais de deformação permanente obtidos nas pesquisas realizadas até o momento com os resultados de campo, bem como analisar a viabilidade técnica de tal execução, uma vez que em laboratório verificou-se que quanto mais agregados reciclados de concreto na mistura, mais tempo e energia eram necessários para garantir a homogeneidade da mistura.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDOU, Moisés Ribeiro; BERNUCCI, Liedi Légi Bariani. **Pavimento ecológico: Uma opção para a pavimentação de vias das grandes cidades**. Trabalho de Iniciação Científica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

AFFONSO, Fernando José de Andrade. **Caracterização de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (RCD) para uso em camadas drenantes de aterros de resíduos sólidos**. 161p. Tese (Mestrado). Programa de Pós-Graduação de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro, 2005.

ALBANO, João Fortini. **Efeitos da variação da carga por eixo, pressão de inflação e tipo de pneu na resposta elástica de um pavimento**. 138p. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Produção - PPGEPP, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1998.

ALDIGUERI, Daniel Rodrigues; PARENTE, Everton Bezerra; SOARES, Jorge Barbosa. **Estudo da aplicabilidade de solo contaminado com petróleo como material para revestimento de vias de baixo volume de tráfego**. Laboratório de Mecânica dos Pavimentos. Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Ceará, 2004.

ALMEIDA, Fernando. **Meio ambiente no século 21 – O mundo dos negócios e o meio ambiente no século 21**. 5ª Edição. p. 123-142. Campinas, 2008. Disponível em <http://books.google.com.br/books?id=UQUw1zD24gsC&pg=PA75&hl=pt-BR&source=gbs_toc_r&cad=3#v=onepage&q&f=false>, acessado em 15 de agosto de 2012.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T283:1989**: Standard Method of Test for Resistance of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) to Moisture-Induced Damage. Washington, United States. 1989.

ANEPAC - Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil. **Agregados para construção civil**. 2011.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARABANI, M; AZARHOOSH, A.R. **The effect of recycled concrete aggregate and steel slag on the dynamic properties of asphalt mixtures** In: Construction and Building Materials, v. 35. p. 1-7. Rasht, Iran, 2012.

ARANHA, Valéria Leite. **Desenvolvimento e meio ambiente**. In: Revista CB Juris. Ano I. n. 2. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação – Procedimentos. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2004.

_____. **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2007.

_____. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2004.

_____. **NBR 13221**: Transporte terrestre de resíduos. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2010.

_____. **NBR 15112**: Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2004.

_____. **NBR 15113**: Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2004. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2004.

_____. **NBR 15114**: Resíduos sólidos da Construção civil - Áreas de reciclagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2004. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2004.

_____. **NBR 15115**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2004.

_____. **NBR 15116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2004.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- _____. **NBR 15619:** Misturas asfálticas — Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas— Requisitos. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2012.
- _____. **NBR 15849:** Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2010.
- _____. **NBR 5564:** Via férrea – Lastro ferroviário – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2011.
- _____. **NBR 7181:** Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 1988.
- _____. **NBR 7211:** Agregados para concreto — Especificação. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2005.
- _____. **NBR 7218:** Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2010.
- _____. **NBR 7251:** Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 1982.
- _____. **NBR 7809:** Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2008.
- _____. **NBR 9917:** Agregados para concreto- Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2009.
- _____. **NBR 9938:** Agregados — Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos — Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2013.
- _____. **NBR 9895:** Solo – Índice suporte Califórnia – Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 1987.
- _____. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2003.
- _____. **NBR NM 30:** Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2001.
- _____. **NBR NM 46:** Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2003.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

_____. **NBR NM 51:** Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2001.

_____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2009.

_____. **NBR NM 53:** Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2009.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **NF-P-98-250-2:** Essais Relatifs aux Chaussées - Préparation des Mélanges Hydrocarbonés, Partie 2: Compactage des Plaques. França, 1997.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **NF-P-98-253-1:** Essais Relatifs aux Chaussées - Déformation Permanente des Mélanges Hydrocarbonés, Partie 1: Essai d'Orniérage. França, 1993.

BARTHOLOMEU, Daniela Bacchi. **Qualificação dos impactos econômicos e ambientais decorrentes do restado de conservação das rodovias brasileiras.** 165p. Tese (Doutorado). Economia Aplicada. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Carlos. Piracicaba, 2006.

BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti da; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros.** PETROBRAS / ABEDA. 3ª reimpressão. 504p. Rio de Janeiro, 2006.

BIANCHI, Flávia Regina; BRITO, Isis Raquel Tacla; CASTRO, Verônica Amanda Brombley. **Estudo comparativo entre pavimento rígido e flexível.** IBRACON. 50º CBC - Congresso Brasileiro do Concreto. Salvador, 2008.

BRANCO, Verônica Teixeira Franco Castelo. **Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado.** 135p. Tese (Mestrado), Programas de Pós-Graduação de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano nacional de resíduos sólidos.** Versão preliminar para consulta pública. Brasília, 2011.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação-Geral de Estudos

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de pavimentação**. 3ª Edição. 274p. Rio de Janeiro, 2006.

BRASIL. Secretaria de Educação Fundamental. Parâmetros Curriculares Nacionais. **Meio Ambiente / Saúde**. Brasília, 1997. Disponível em <<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/livro091.pdf>>, acessado em 15 de agosto de 2012.

BUTTLER, Alexandre Marques. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto – Influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados**. 199p. Dissertação (Mestrado), Engenharia de Estruturas. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003.

CAPRA, Fritjot; **Meio ambiente no século 21 – Alfabetização Ecológica: O desafio para a educação do século 21**. 5ª Edição. Campinas, 2008. Disponível em <http://books.google.com.br/books?id=UQUw1zD24gsC&pg=PA75&hl=pt-BR&source=gbs_toc_r&cad=3#v=onepage&q&f=false>, acessado em 15 de agosto de 2012.

CARNEIRO, Alex Pires; BURGOS, Paulo César; ALBERTE, Elaine Pinto V. **Uso do agregado reciclado em camadas de base e sub-base de pavimentos**. Projeto Entulho Bom. EDUFBA – Editora da Universidade Federal da Bahia / Caixa Econômica Federal. p. 190-227. Salvador 2001.

CARNIN, Raquel Luísa Pereira. **Reaproveitamento do resíduo de areia verde de fundição como agregado em misturas asfálticas**. 131p. Tese (Doutorado). Curso de Pós Graduação em Química. Setor de Ciências Exatas. Departamento de Química. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2008.

CASSA, José Clodoaldo S.; BRUM, Irineu Antônio S. de; CARNEIRO, Alex Pires; COSTA, Dayana Bastos. **Diagnóstico dos setores produtores de resíduos na região metropolitana de Salvador/BA**. Projeto Entulho Bom. EDUFBA – Editora da Universidade Federal da Bahia / Caixa Econômica Federal. p. 47-75. Salvador, 2001.

CAVALCANTE, Fabiano Pereira. **Avaliação das características funcionais e estruturais da rodovia BR-230/PB Lote III**. 548p. Tese (Mestrado). Programa de

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Pós-Graduação da Universidade Federal de Pernambuco. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2005.

CBIC – Câmara Brasileira da Indústria da Construção. CEE/CBIC – Comissão de Economia e Estatística. **Balanço do setor de construção civil no Brasil em 1997 e perspectivas para 1998.** Brasília, 1998. Disponível em <<http://www.cbicdados.com.br/files/textos/039.pdf>>, acessado em 10 de agosto de 2012.

CBIC – Câmara Brasileira da Indústria da Construção. **Informativo econômico - Construção civil: Desempenho e perspectivas.** Brasília, 2011. Disponível em <<http://www.cbicdados.com.br/files/textos/064.pdf>>, acessado em 10 de agosto de 2012.

CEBDS – Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável. **Relatório de Sustentabilidade 2008/2010.** 2010. Disponível em <http://www.cebds.org.br/media/uploads/pdf/cebds_relatorio_completo.pdf>, acessado em 15 de agosto de 2012.

CEBDS – Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável. **Visão Brasil 2050.** 2012. Disponível em <http://www.cebds.org.br/media/uploads/pdf/visao_brasil_2050_-_vfinal.pdf>, acessado em 15 de agosto de 2012.

CERATTI, Jorge Augusto Pereira; REIS, Rafael Marçal Martins de. **Manual de dosagem de concreto asfáltico.** Instituto Pavimentar / ANEOR – Agência Nacional das Empresas de Obras Rodoviárias / ABDA – Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto / Petrobras. Ed. Oficina de Textos. São Paulo, 2011.

CHEN, Meizhu; LIN, Juntao; WU, Shaopeng. **Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture.** In: Construction and Building Materials. v. 25. p. 3909-3914. Wuhan, China, 2011.

CHINI, Abdol R.; KUO, Shiou-San; ARMAGHANI, Jamshid M.; DUXBURY, James P. **Test of recycled concrete aggregate in accelerated test track.** In: Journal of Transportation Engineering. v. 127. n. 6. p. 486-492. Reston, Virginia, 2001.

CIOCCHI, Luis. **Gestão de resíduos – reciclagem de Concreto.** In: Revista Técnica. n° 77, p. 48-50. Agosto, 2003.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CNT – Confederação Nacional do Transporte. **Boletim Estatístico**. 2012. Disponível em <http://www.cnt.org.br/Imagens%20CNT/PDFs%20CNT/Boletim%20Estat%20C3%ADs%20Boletim%20Estatistico%20CNT%20-%20jan_2012.pdf>, acessado em 15 de agosto de 2012.

CNT – Confederação Nacional do Transporte. **Relatório Pesquisa CNT de Rodovias**. 2011. Disponível em <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Relatorios/Boletim%20Pesquisa%20CNT%20de%20Rodovias%202011.pdf>>, acessado em 15 de agosto de 2012.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente, **Resolução nº 307**. Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Habitação. 2002. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html>>, acessado em 12 de julho de 2012.

CROSS, Stephen A.; BROWN, E. Ray; **Selection of aggregate properties to minimize rutting of heavy duty pavements**. Effects of aggregate and mineral fillers on asphalt mixture performance. Philadelphia, 1992. Disponível em <<http://books.google.com.br/books?id=B0iJ7GymN-sC&printsec=frontcover&hl=pt-BR#v=onepage&q&f=false>>, acessado em 17 de setembro de 2012.

DATAFOLHA. Gazeta do Povo (PR): **Saúde e violência são os principais problemas de Curitiba, diz Datafolha**. 2012. Disponível em <<http://www.gazetadopovo.com.br/vidapublica/conteudo.phtml?id=1278663&tit=Saude-e-violencia-sao-os-principais-problemas-de-Curitiba-diz-Datafolha>>, acessado em 24 de abril de 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 035:1998**: Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”; Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1998.

_____. **DNER-ME 043:1995**: Misturas asfálticas a quente – ensaio Marshall; Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1995.

_____. **DNER-ME 054:1997**: Equivalente de areia; Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1997.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

_____. **DNER-ME 086:1994:** Agregado – determinação do índice de forma; Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1994.

_____. **DNER-ME 089:1994:** Agregados – avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou magnésio; Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1994.

_____. **DNER-ME 096:1998:** Agregado graúdo – avaliação da resistência mecânica pelo método dos 10% de finos; Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1998.

_____. **DNER-ME 138:1994:** Misturas asfálticas- determinação à tração por compressão diametral; Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1994.

_____. **DNER-ME 197:1997:** Agregados – determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos; Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1997.

_____. **DNER-ME 397:1999:** Agregados – determinação do índice de degradação Washington - IDW; Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1999.

_____. **DNER-ME 398:1999:** Agregados – índice de degradação após compactação Proctor (IDp); Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1999.

_____. **DNER-ME 399:1999:** Agregados – determinação da perda ao choque no aparelho Treton; Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1999.

_____. **DNER-ME 401:1999:** Agregados – determinação do índice de degradação de rochas após compactação Marshall, com ligante – IDML e sem ligante - IDM; Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Anuário Mineral Brasileiro.** 2004. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriaDocumento/AMB2004/I_2004.pdf>, acessado em 20 de agosto de 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Anuário Mineral Brasileiro.** 2010. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriaDocumento/AMB2010/Partel_2010.pdf>, acessado em 20 de agosto de 2012.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Pavimentos flexíveis – concreto asfáltico – especificação de serviço. DNIT-ES 031:2006.** Especificação de Serviço, Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Sistema de custos rodoviários. Custo Unitário de Referência.** Paraná. Novembro, 2012.

DIAS, João Fernando. **Avaliação da fabricação de telhas cerâmicas para seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo.** Tese (doutorado). 251p. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

EC – EUROPEAN COMMISSION.. **Construction and demolition waste management practices and their economic impacts.** 1999

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **FHWA-RD-97-148: User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction.** 2012. Disponível em:

<

<http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/intro.cfm> >. Acesso em 15 de agosto de 2012.

FERNANDES, Cinconegui da Graça Fernandes. **Caracterização mecânica de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição dos municípios do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte para uso em pavimentação.** 109p. Tese (mestrado). Pós-graduação de engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004

GOUVEIA, Lilian Taís de; FERNANDES JÚNIOR, José Leomar. **Efeitos da absorção de ligante pelos agregados nas propriedades volumétricas de mistura asfáltica.** In: 36ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv). Curitiba/PR. 24 a 26 de agosto de 2005. Curitiba, 2005.

GUIMARÃES, Renato Cabral; RIBEIRO, Handerson Cabral. **Utilização de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em revestimentos asfálticos.** Projeto de Pesquisa. Unidade Universitária de Ciências Exatas e Tecnológicas - Engenharia Civil. Anápolis, GO, 2005.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

HANSEN, Torben C.; NARUD, Henrik. **Recycled concrete and silica fume make calcium silicate bricks**. In: Cement and Concrete Research. vol. 13. p. 626-630. Denmark, 1983.

HENDRICKS, F.; JANSSEN, G. M. T. **Reuse of construction and demolition waste in the Netherlands for road constructions**. In: HERON, v. 46, n. 2, p. 109-117. Delft, 2001.

HILL, Annette R.; DAWSON, Andrew R.; MUNDY, Michael. **Utilization of aggregate materials in road construction and bulk fill**. In: Resources, Conservation & Recycling. v. 32. p. 305-320. Nottingham, Reino Unido; South Australia, Australia, 2001.

HISLOP, Walter P.; COREE, Brian J. **VMA as a design parameter in hot-mix asphalt**. Mid-Continent Transportation Symposium, Iowa, USA, 2000.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2010**. 2010a. Disponível em < <http://censo2010.ibge.gov.br/>>, acessado em 23 de abril de 2013.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produto Interno Bruto dos Municípios 2010**. 2010b. Disponível em < <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pibmunicipios/2010/>>, acessado em 23 de abril de 2013.

ICLEI – Governos Locais pela Sustentabilidade; Secretaria do Meio Ambiente. Governo do Rio de Janeiro; **Conjuntura Econômica**; Fundação Getúlio Vargas. Instituto Brasileiro de Economia. I Seminário Construção Civil e Sustentabilidade. São Paulo, julho de 2007. Disponível em <http://www.fgv.br/mailling/ibre/construcaocivil/Objetivo_programa_31.pdf>, acessado em 15 de agosto de 2012.

IPARDES - Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social, **Resumo da Malha Rodoviária – Paraná**. Paraná, 2011. Disponível em <http://www.ipardes.pr.gov.br/anuario_2011/2infraestrutura/tab2_3_2.htm>, acessado em 23 de abril de 2013.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, **Boletim de Conjuntura nº 78**. 2007. Disponível em

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

<http://www.ipea.gov.br/sites/000/2/boletim_conjuntura/boletim_78/BC78d_Conj_Em_prego.pdf>, acessado em 10 de agosto de 2012.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Gazeta do Povo (PR): **Acidente em BR custa R\$ 53 mil, afirma DNIT**. 2012. Disponível em <http://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=12975&catid=159&Itemid=75>, acessado em 15 de agosto de 2012.

IPPUC – Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba. Gazeta do Povo (PR): **Antipó “tapa” 60% das ruas**. 2013. Disponível em <<http://www.gazetadopovo.com.br/vidaecidadania/conteudo.phtml?id=1337964&tit=Antipo-tapa-60-das-ruas>>, acessado em 24 de abril de 2013.

JOHN, Vanderley Moacyr. **Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 102p. Tese (livre docência). Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

JOHN, Vanderley M.; AGOPYAN, Vahan. **Reciclagem de resíduos da construção**. In: Seminário – Reciclagem de Resíduos Sólidos Domiciliares. Secretaria do Estado do Meio Ambiente, CETESB, Governo do Estado de São Paulo. São Paulo, 2000.

KUO, Shiou-San; MAHGOUB, Hesham S.; ORTEGA, Jose E. **Use of recycled concrete made with Florida limestone aggregate for a base course in flexible pavement**. Final Report, Florida Department of Transportation. Orlando, Florida, 2001.

LAURITZEN, Erik. K. **Rilem, Bulletin: Third International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry**. In: Materials and Structure.. v. 27. n. 169. p. 307-310. Odense, Denmark, 1994.

LEITE, Fabiana da Conceição. **Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos**. Dissertação (Mestrado). 185p. Departamento de Engenharia de Transportes. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007

LEITE, Mônica Batista. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Tese (Doutorado). 270p. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LEVY, Salomon Mony. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. Tese (Doutorado). 194p. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

LIDE – Grupo de Líderes Empresariais. **3º Fórum Mundial de Sustentabilidade. Manaus.** 22 e 24 de março de 2012. Disponível em <<http://www.rpmanaus.com/2012/03/3-forum-mundial-de-sustentabilidade.html>>, acessado em 15 de agosto de 2012.

LIMA, André Theophilo. **Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente**. Dissertação (mestrado). 99p. Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2003

LIMA, José Antônio Ribeiro de Lima. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduos de construção reciclados e de suas aplicações em argamassas e concretos**. Dissertação (Mestrado). 246p. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 1999.

LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Silvia Cristina A. **Tratamento de minérios**. CETEM – Centro de Tecnologia Mineral / MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia. 5ª edição. 956p. Rio de Janeiro, 2010.

MARINHO, Marília Neves. **Análise do desempenho mecânico de concretos betuminosos usinados a quente com o uso de agregado graúdo reciclado de concreto**. 146p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2011.

MILLS-BEALE, Julian; YOU, Zhanping. **The mechanical properties of asphalt mixtures with recycled concrete aggregates**. In: Construction and Building Materials. v. 24. p. 230-235. Michigan, Estados Unidos, 2010.

MIRANDA, Leonardo Fagundes Rosemback. **Contribuição ao desenvolvimento da produção e controle de argamassas de revestimento com areia reciclada lavada de resíduos Classe A da construção civil**. Tese (Doutorado). 441p. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- MIRANDA, Leonardo Fagundes Rosemback. **Notas de Aula da Disciplina Gestão e Tecnologia de Aproveitamento de Resíduos da Construção Civil**. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2011.
- MIRANDA, Leonardo Fagundes Rosemback; ANGULO, Sérgio Cirelli; CARELI, Élcio Duduchi. **A reciclagem de resíduos de construção civil no Brasil: 1986 - 2008**. In: Ambiente Construído. v. 9. n. 1. p. 57-71. Porto Alegre, 2009.
- MIRANDA, Leonardo F. R.; SELMO, Sílvia M. S. **Avaliação de argamassas com entulhos reciclados por procedimentos racionais de dosagem**. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Anais. p. 295-307. Vitória, 1999.
- MOMBER, A.W. **The fragmentation of cementitious composites in a jaw breaker**. In: Theoretical and Applied Fracture Mechanics. n. 38. p.151-164. Duisburg, Germany, 2002.
- MOREIRA, José Franklin; DIAS, João Fernando; REZENDE, Maria Elisa. **Utilização de resíduos de construção de demolição como base de pavimentos na cidade de Uberlândia-MG**. In: Revista Vias Gerais. Associação dos Engenheiros do DER/MG. ASSENDER. 2007.
- MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis: critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas**. Tese (Doutorado). 366p. Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1991.
- MOTTA, Rosângela dos Santos. **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego**. Dissertação (Mestrado). 160p. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.
- MOURA, Edson de. **Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório**. Tese (Doutorado). 299p. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.
- NATAATMADJA, Andreas; TAN, Y. L. **Resilient response of recycled concrete road aggregates**. In: Journal of Transportation Engineering., v.127. n.5. p.450-453. Reston, Virginia, 2001.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

NUNES, Kátia Regina Alves. **Avaliação de investimentos e de desempenho de centrais de reciclagem para resíduos sólidos de construção e demolição**. Tese (Doutorado). Programas de Pós-Graduação de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004

OGURTSOVA, J.; BIRMAN, S.; COELHO, V.; Concreto Asfáltico. Boletim Técnico nº 08. 2ª Edição. Departamento de Estradas de Rodagem – DER. Paraná, 1999.

OLIVEIRA, Davidsson Canesso de. **PROACESSO – Obras de pavimentação de rodovias como fator indutor de desenvolvimento econômico e social**. Curso de Pós-Graduação. MBA em Gestão Estratégica de Projetos. 21p. Centro Universitário UMA. Diretoria de Educação Continuada. Pesquisa e Extensão. Belo Horizonte, 2010.

PARANÁ. Governo do Estado do Paraná. Casa Civil. Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná – DER/PR. **Composição da Malha Rodoviária Estadual**, 2011. Disponível em <<http://www.der.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=24>>, acessado em 19 de julho de 2012.

PARANAVITHANA, Sumeda; MOHAJERANI, Abbas. **Effects of recycled concrete aggregates on properties of asphalt concrete**. In: Resources, Conservation and Recycling. n. 48. p. 1-12. Melbourne, Austrália, 2006.

PATRIOTA, Marcelo de Barros; MOTTA, Laura Maria Goretti da; FILHO, Ivaldo Dário da Silva Pontes. **Efeito da adição de borracha reciclada de pneus pelo processo seco à mistura asfáltica tipo CBUQ**. XVIII ANPET, 2004, Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Florianópolis-SC, 8 a 12 de novembro de 2004.

PÉREZ, I.; TOLEDANO, M.; GALLEGU, J.; TAIBO, J. **Asphalt mixtures with construction and demolition debris**. In: Materiales de Construcción. vol. 57, 285, p. 17-29. Espanha, 2007.

PÉREZ, I.; PASANDIN, A.R.; MEDINA, L.. **Hot mix asphalt using C&D waste as coarse aggregates**. In: Materials & Design. vol. 36, p. 840-846. Espanha, 2011.

PETERSON, G.D.; DAVISON, R.R.; GLOVER, C.J. & BULLIN, J.A. **Effect of Composition on Asphalt Recycling Agent Performance**. In: Transportation

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Research Record, 1436, TRB. p 38-46. National Research Council, Washington, D.C. 1994.

PINTO, Tarcísio de Paula. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana..** Tese (Doutorado). 189p. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil. Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

POON, Chi S. **Management and recycling of demolition waste in Hong Kong.** In: Waste Management and Research, v. 15, p. 561-572, Hung Hom, Hong Kong, 1997.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **Camadas de reforço do subleito, sub-base e base mista de pavimento com agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil.** Secretaria de Infra-estrutura Urbana, Especificação Técnica de Serviço, São Paulo, 2003. Disponível em: <http://ww2.prefeitura.sp.gov.br/arquivos/secretarias/infraestruturaurbana/normas_tecnicas_de_pavimentacao/pmspets0012003.pdf>.

PRESIDENTE DA REPÚBLICA, Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos. **CONSTITUIÇÃO DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL DE 1988.** Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicaocompilado.htm>, acessado em 20 de abril de 2013.

PRESIDENTE DA REPÚBLICA, Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos. **DECRETO Nº 7.746, DE 5 DE JUNHO DE 2012.** Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Decreto/D7746.htm>, acessado em 20 de abril de 2013.

PRESIDENTE DA REPÚBLICA, Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos. **LEI Nº 6.938, DE 31 DE AGOSTO DE 1981.** Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm>, acessado em 20 de abril de 2013.

PRESIDENTE DA REPÚBLICA, Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos. **LEI Nº 8.666, DE 21 DE JUNHO DE 1993.** Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l8666cons.htm>, acessado em 20 de abril de 2013.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PROCIMM. **Workshop do PROCIMM**. Santa Catarina, 12 e 13 de maio de 2011. Disponível em <<http://engenhariacivildauesc.blogspot.com.br/2011/05/i-workshop-do-procimm.html>>, acessado em 15 de agosto de 2012.

RAVINDRARAJAH, R. Sri; TAM, T. C. **Recycling concrete as fine aggregate in concrete**. In: The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete. vol. 9. n. 4. p. 235-241. Singapore, 1987.

RIBEIRO, Emília Martins. **Caracterização de agregados graúdos do Rio de Janeiro para concreto estrutural**. Tese (Doutorado). 343p. Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

RON, Marta Baragaño; CASAGRANDE, Michéle Dal Toé; DO VALE, Aline Corales; LOPES, Manuela de Mesquita; SOARES, Jorge Barbosa. **Aplicabilidade de Resíduos Reciclados da Construção Civil e Demolição Como Agregados em Misturas Asfálticas**. In: 15ª RPU - Reunião de Pavimentação Urbana. Anais. Trabalho nº 19. Salvador, 2008.

SAEED, Athar; HAMMONS, Michael I.; REED, Jessica L. (2007). **Comprehensive Evaluation, Design, and Construction Techniques for Airfield Recycled Concrete Aggregate as Unbound Base**. In: Transportation Research Board 86th Annual Meeting. Washington DC, United States, 2007. 16p.

SCHNEIDER, Dan Moche. **Deposições irregulares de resíduos da construção civil na cidade de São Paulo**. Dissertação (Mestrado). 130p. Programa de Pós-Graduação em Saúde Pública. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

Secretário de Logística e Tecnologia da Informação do Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. **INSTRUÇÃO NORMATIVA N. 01, DE 19 DE JANEIRO DE 2010**. Disponível em: < <http://cpsustentaveis.planejamento.gov.br/wp-content/uploads/2010/03/Instru%C3%A7%C3%A3o-Normativa-01-10.pdf>>, acessado em 20 de abril de 2013.

SILVA, Bruno Tiago Angelo da; SILVA, Maria Gerlânia Baraúna da; BARROSO, Suelly Helena de Araújo. **Avaliação da energia de compactação no desempenho de mistura produzida a partir de agregados reciclados para emprego em camadas granulares dos pavimentos**. Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2008.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SILVA, Cesar Augusto Rodrigues da Silva. **Estudo do agregado reciclado de construção civil em misturas betuminosas para vias urbanas**. Dissertação (Mestrado). 194p. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Ouro Preto – Escola de Minas. Ouro Preto, 2009.

TORRES, Maria João; GOMES, João Castro; ZOOROB, Salah E. **Ensaio de "imersão-compressão", "sensibilidade à água" e "gelo-degelo" em misturas betuminosas recicladas a semi-quente do pavimento da EN244, em Ponte de Sôr**. In: Revista Engenharia Civil da Universidade do Minho. número 36. p. 51-62. Portugal, 2010.

UCHIKAWA, W; HANEHARA, S; **Concrete in the Service of Mankind – Recycling of Concrete Waste**. 1ª Edição. E&FN Spon, Londres, 1996. Disponível em <[http://books.google.com.br/books?hl=pt-](http://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=TqjyXpkxKnwC&oi=fnd&pg=PA163&dq=UCHIKAWA+HANEHARA+86&ots=Kupe5uR3Td&sig=R2kGH8z39CpaYPE5jbUflgtjcgA#v=onepage&q=UCHIKAWA%20HANEHARA%2086&f=false)

[BR&lr=&id=TqjyXpkxKnwC&oi=fnd&pg=PA163&dq=UCHIKAWA+HANEHARA+86&ots=Kupe5uR3Td&sig=R2kGH8z39CpaYPE5jbUflgtjcgA#v=onepage&q=UCHIKAWA%20HANEHARA%2086&f=false](http://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=TqjyXpkxKnwC&oi=fnd&pg=PA163&dq=UCHIKAWA+HANEHARA+86&ots=Kupe5uR3Td&sig=R2kGH8z39CpaYPE5jbUflgtjcgA#v=onepage&q=UCHIKAWA%20HANEHARA%2086&f=false)> acessado em 21 de agosto de 2012. p. 163-173.

UFPR – Universidade Federal do Paraná. **1º Workshop de Rodovias Sustentáveis**. Curitiba, 27 de julho de 2012. Disponível em <<http://www.ufpr.br/portalufpr/noticias/ufpr-promove-1%C2%BA-workshop-de-rodovias-sustentaveis-do-pais/>>, acessado em 15 de agosto de 2012.

VASCONCELOS, Kamilla Lima; SOARES, Jorge Barbosa. **Projeto de misturas de concreto betuminoso reciclado a quente com diferentes teores de material fresado**. LMP – Laboratório de Mecânica dos Pavimentos. Petran – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes. DET – Departamento de Engenharia de Transportes. UFC – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2003.

VERDES, Rodovias. **Determinação da massa específica de misturas asfálticas através do método RICE**. UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina. 2010.

VIEIRA, Geilma L.; DENISE, C. C. Dal Molin; Lima, Flávio, B. **Resistência e durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição**. In: Revista Engenharia Civil. UM. Número 19, p. 5-18. 2004.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- WEN, Haifang; BHUSAL, Sushantat; Wen, Ben. **Laboratory evaluation of waste cooking oil-based bioasphalt as sustainable binder for hot-mix asphalt**. In: Alternative Binders for Sustainable Asphalt Pavements. Papers from a Workshop. Transportation Research Circular. number E-C165, p, 49-60. Washington, D.C, 2012.
- WESSELING, Diogo Henrique. **Estudo do comportamento mecânico de misturas em concreto asfáltico com incorporação de resíduos industriais**. Dissertação (mestrado). 143p. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.
- WONG, Yik Diew; SUN, Darren Delai; LAI, Dickson. **Value-added utilisation of recycled concrete in hot-mix asphalt**. In: Waste Managent. n. 27. Issue 2. p. 294-301. Singapore, 2007.
- ZORDAN, Sérgio Eduardo. **A Utilização do Entulho como Agregado na Confecção do Concreto**. Dissertação (Mestrado). 140p. Departamento de Saneamento e Meio Ambiente. Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1997.
- ZORDAN, Sérgio Eduardo. **Entulho da Indústria da Construção Civil – Ficha Técnica**, 1999. Disponível em <http://www.reciclage.pcc.usp.br/entulho_ind_ccivil.htm>, acessado em 15 de agosto de 2012.
- ZORDAN, Sérgio Eduardo; JOHN, Wanderley Moacyr. **Metodologia de Avaliação do Potencial de Reciclagem de Resíduos**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. Boletim Técnico – Série BT/PCC. São Paulo, 2003.
- ZHU, Jiqing; Wu, Shaopeng; ZHONG, Jinjun; WANG, Dongming. **Investigation of asphalt mixture containing demolition waste obtained from earthquake-damage buildings**. In: Construction and Building Materials. v. 29. p.466-475. China, 2011.

7. ANEXOS

7. ANEXOS

7.1. Análises granulométricas

7.1.1. *Pó de pedra*

Seguem os dados da análise granulométrica do agregado miúdo, pó de pedra, utilizado nesta pesquisa na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Análise granulométrica – Pó de pedra.

PÓ DE PEDRA	
Peneira (mm)	Mat Passante (%)
19	100,00
12,5	100,00
9,5	100,00
4,8	99,15
2,4	68,48
1,2	36,29
0,6	20,15
0,42	14,98
0,3	12,17
0,15	7,36
0,075	4,00

7.1.2. *Brita 1*

Seguem os dados da análise granulométrica do agregado graúdo natural, fração brita 1, utilizado nesta pesquisa na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 – Análise Granulométrica – Brita 1.

BRITA 1 - AGREGADO NATURAL	
Peneira (mm)	Mat Passante (%)
19	97,98

7. ANEXOS

Continuação da Tabela 7.2 – Análise Granulométrica – Brita 1.

BRITA 1 - AGREGADO NATURAL	
Peneira (mm)	Mat Passante (%)
12,5	41,03
9,5	7,58
4,8	0,07
2,4	0,06
1,2	0,06
0,6	0,06
0,42	0,06
0,3	0,06
0,15	0,05
0,075	0,13

7.1.3. Pedrisco

Seguem os dados da análise granulométrica do agregado graúdo natural, fração pedrisco, utilizado nesta pesquisa na Tabela 7.3.

Tabela 7.3 – Análise Granulométrica – pedrisco – agregado natural.

PEDRISCO - AGREGADO NATURAL	
Peneira (mm)	Mat Passante (%)
19	100,00
12,5	100,00
9,5	100,00
4,8	25,57
2,4	3,93
1,2	2,26
0,6	2,03
0,42	1,97
0,3	1,90
0,15	1,81
0,075	1,53

7. ANEXOS

7.2. Análise estatística da absorção e da massa específica real para o pedrisco e brita 1

7.2.1. Análise estatística – Absorção – Brita 1

A Tabela 7.4 apresenta os somatórios totais e as médias para a análise de variância.

Tabela 7.4 – Absorção – Brita 1.

		ABSORÇÃO (%) BRITA 1			
		RESISTÊNCIAS			
		A20	A30	A40	
REPETIÇÕES	1	4,96	5,26	5,24	
	2	5,44	4,87	5,31	
	3	4,05	3,71	5,24	
	4	4,20	3,65	5,17	
	5	4,14	3,88	5,83	
TOTAIS		22,78	21,37	26,80	70,94
MÉDIAS		4,56	4,27	5,36	

Tabela 7.5 – Tabela ANOVA - Absorção – Brita 1.

TABELA ANOVA					
Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tab
Resistências	3,17	2	1,59	4,78	3,89
Resíduo	3,98	12	0,33		
Total	7,15	14			

A variável é significativa

1) Análise de variância

$$\begin{aligned}
 TC &= 335,52 \\
 SQM &= 3,17 \\
 SQT &= 7,15 \\
 SQR &= 3,98
 \end{aligned}$$

7. ANEXOS

A Tabela 2.5 apresenta a tabela ANOVA para a comparação múltipla de médias, que engloba o desvio padrão das médias e o limite de decisão.

2) Comparação múltipla de médias

Desvio Padrão das Médias

$$S_x = 0,26$$

Limite de Decisão:

$$L_d = 0,77$$

Na Tabela 7.6 foram ordenadas todas as médias em ordem crescente para, através das diferenças entre as médias e comparação com o limite de decisão, verificar se há diferenças significativas ou não.

Tabela 7.6 – Ordenação das médias em ordem crescente - Absorção – Brita 1.

Ordenação das médias em ordem crescente		
Y(1)	Y(2)	Y(3)
4,27	4,56	5,36

Diferenças das médias:

$$Y(2) - Y(1) = 0,28 \text{ Não há diferenças significativas}$$

$$Y(3) - Y(1) = 1,09 \text{ Há diferenças significativas}$$

$$Y(3) - Y(2) = 0,80 \text{ Há diferenças significativas}$$

Tabela 7.7 – Absorção – Brita 1.

BRITA 1	RESISTÊNCIAS		
	A20	A30	A40
ABSORÇÃO (%)	4,555	4,274	5,359

7. ANEXOS

A Tabela 7.7 e a Figura 7.1 mostram os resultados médios da propriedade de absorção obtidos para a brita 1.

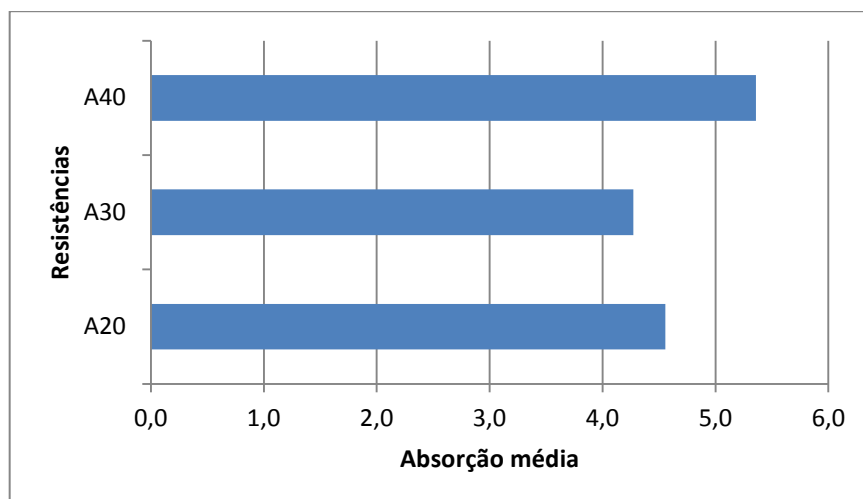


Figura 7.1 – Absorção – Brita 1.

7.2.2. Análise estatística – Absorção – Pedrisco

A Tabela 7.8 apresenta os somatórios totais e as médias para a análise de variância.

Tabela 7.8 – Absorção – Pedrisco.

		ABSORÇÃO (%) PEDRISCO			
		RESISTÊNCIAS			
		A20	A30	A40	
REPETIÇÕES	1	9,04	9,03	8,12	
	2	8,86	9,02	8,48	
	3	8,30	9,78	9,22	
	4	7,59	8,69	8,01	
	5	7,80	9,14	9,29	
TOTAIS		41,58	45,65	43,11	130,35
MÉDIAS		8,32	9,13	8,62	

7. ANEXOS

1) Análise de variância

$$\begin{aligned} TC &= 1132,68 \\ SQM &= 1,69 \\ SQT &= 5,41 \\ SQR &= 3,71 \end{aligned}$$

A Tabela 7.9 apresenta a tabela ANOVA para a comparação múltipla de médias, que engloba o desvio padrão das médias e o limite de decisão.

Tabela 7.9 – Tabela ANOVA - Absorção – Pedrisco.

TABELA ANOVA					
Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tab
Resistências	1,69	2	0,85	2,73	3,89
Resíduo	3,71	12	0,31		
Total	5,41	14			

A variável não é significativa

2) Comparação múltipla de médias

Desvio Padrão das Médias

$$S_x = 0,25$$

Limite de Decisão:

$$L_d = 0,75$$

Tabela 7.10 – Ordenação das médias em ordem crescente - Absorção – Pedrisco.

Ordenação das médias em ordem crescente		
Y(1)	Y(2)	Y(3)
8,32	8,62	9,13

7. ANEXOS

Na Tabela 7.10 foram ordenadas todas as médias em ordem crescente para, através das diferenças entre as médias e comparação com o limite de decisão, verificar se há diferenças significativas ou não.

Diferenças das médias:

$Y(2) - Y(1) = 0,30$ **Não há diferenças significativas**

$Y(3) - Y(1) = 0,81$ **Há diferenças significativas**

$Y(3) - Y(2) = 0,51$ **Não há diferenças significativas**

A Tabela 7.11 e a Figura 7.2 mostram os resultados médios da propriedade de absorção obtidos para o pedrisco.

Tabela 7.11 – Absorção – Pedrisco.

PEDRISCO	RESISTÊNCIAS		
	A20	A30	A40
ABSORÇÃO (%)	8,317	9,131	8,622

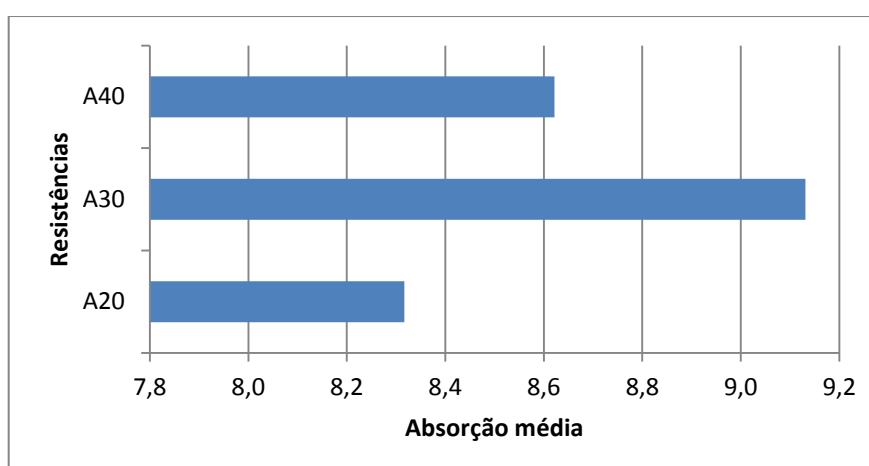


Figura 7.2 – Absorção – Pedrisco.

7. ANEXOS

7.2.3. Análise estatística – Massa específica real – Brita 1

A Tabela 7.12 apresenta os somatórios totais e as médias para a análise de variância.

Tabela 7.12 – Massa específica real – Brita 1.

		MASSA ESPECÍFICA REAL (g/cm³) BRITA 1			
		RESISTÊNCIAS			
		A20	A30	A40	
REPETIÇÕES	1	2,70	2,70	2,75	
	2	2,68	2,69	2,74	
	3	2,68	2,71	2,71	
	4	2,69	2,71	2,71	
	5	2,69	2,71	2,71	
	TOTAIS	13,44	13,53	13,63	40,60
	MÉDIAS	2,69	2,71	2,73	

1) Análise de variância

$$\begin{aligned}
 TC &= 109,87 \\
 SQM &= 0,00 \\
 SQT &= 0,01 \\
 SQR &= 0,00
 \end{aligned}$$

A Tabela 7.13 apresenta a tabela ANOVA para a comparação múltipla de médias, que engloba o desvio padrão das médias e o limite de decisão.

Tabela 7.13 – Tabela ANOVA - Absorção – Pedrisco.

TABELA ANOVA					
Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tab
Resistências	0,00	2	0,00	12,12	3,89
Resíduo	0,00	12	0,00		
Total	0,01	14			

A variável é significativa

7. ANEXOS

2) Comparação múltipla de médias

Desvio Padrão das Médias

$$S_x = 0,01$$

Limite de Decisão:

$$L_d = 0,02$$

Na Tabela 7.14 foram ordenadas todas as médias em ordem crescente para, através das diferenças entre as médias e comparação com o limite de decisão, verificar se há diferenças significativas ou não.

Tabela 7.14 – Ordenação das médias em ordem crescente – Massa Específica Real – Brita 1.

Ordenação das médias em ordem crescente		
Y(1)	Y(2)	Y(3)
2,69	2,71	2,73

Diferenças das médias:

$$Y(2) - Y(1) = 0,02 \text{ Não há diferenças significativas}$$

$$Y(3) - Y(1) = 0,04 \text{ Há diferenças significativas}$$

$$Y(3) - Y(2) = 0,02 \text{ Não há diferenças significativas}$$

Tabela 7.15 – Massa específica real – Brita 1.

BRITA 1	RESISTÊNCIAS		
	A20	A30	A40
MASSA ESPECÍFICA REAL (g/cm ³)	2,688	2,706	2,726

7. ANEXOS

A Tabela 7.15 e a Figura 7.3 mostram os resultados médios da propriedade de massa específica real obtidos para a brita 1.

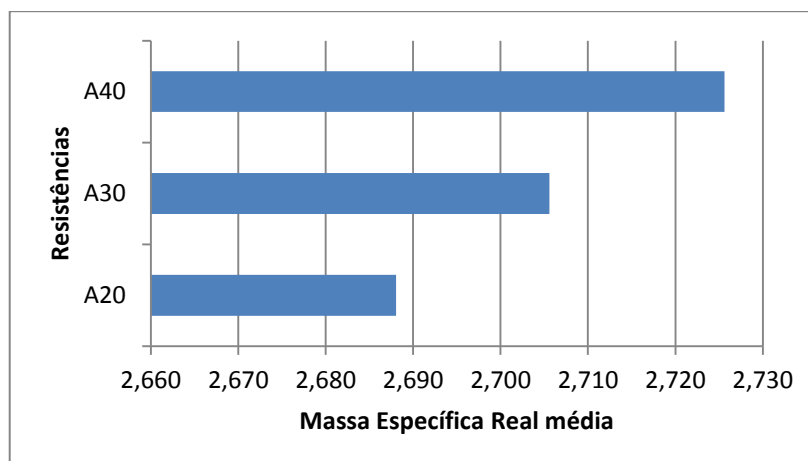


Figura 7.3 – Massa específica real – Brita 1.

7.2.4. Análise estatística – Massa específica real – Pedrisco

A Tabela 7.16 apresenta os somatórios totais e as médias para a análise de variância.

Tabela 7.16 – Massa específica real – Pedrisco.

		MASSA ESPECÍFICA REAL (g/cm³) PEDRISCO			
		RESISTÊNCIAS			
		A20	A30	A40	
REPETIÇÕES	1	2,69	2,61	2,71	
	2	2,62	2,63	2,63	
	3	2,70	2,68	2,70	
	4	2,66	2,68	2,71	
	5	2,67	2,67	2,70	
	TOTAIS	13,33	13,26	13,45	40,04
	MÉDIAS	2,67	2,65	2,69	

7. ANEXOS

1) Análise de variância

$$\begin{aligned} TC &= 106,89 \\ SQM &= 0,00 \\ SQT &= 0,02 \\ SQR &= 0,01 \end{aligned}$$

A Tabela 7.17 apresenta a tabela ANOVA para a comparação múltipla de médias, que engloba o desvio padrão das médias e o limite de decisão.

Tabela 7.17 – Tabela ANOVA – Massa específica real – Pedrisco.

TABELA ANOVA					
Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tab
Resistências	0,00	2	0,00	1,76	3,89
Resíduo	0,01	12	0,00		
Total	0,02	14			

A variável não é significativa

2) Comparação múltipla de médias

Desvio Padrão das Médias

$$S_x = 0,01$$

Limite de Decisão:

$$L_d = 0,04$$

Tabela 7.18 – Ordenação das médias em ordem crescente – Massa Específica Real – Pedrisco.

Ordenação das médias em ordem crescente		
Y(1)	Y(2)	Y(3)
2,65	2,67	2,69

7. ANEXOS

Na Tabela 7.18 foram ordenadas todas as médias em ordem crescente para, através das diferenças entre as médias e comparação com o limite de decisão, verificar se há diferenças significativas ou não.

Diferenças das médias:

$Y(2) - Y(1) = 0,01$ **Não há diferenças significativas**

$Y(3) - Y(1) = 0,04$ **Não há diferenças significativas**

$Y(3) - Y(2) = 0,02$ **Não há diferenças significativas**

A Tabela 7.19 e a Figura 7.4 mostram os resultados médios da propriedade de massa específica real obtidos para o pedrisco.

Tabela 7.19 – Massa específica real – Pedrisco.

PEDRISCO	RESISTÊNCIAS		
	A20	A30	A40
MASSA ESPECÍFICA REAL (g/cm ³)	2,666	2,653	2,690

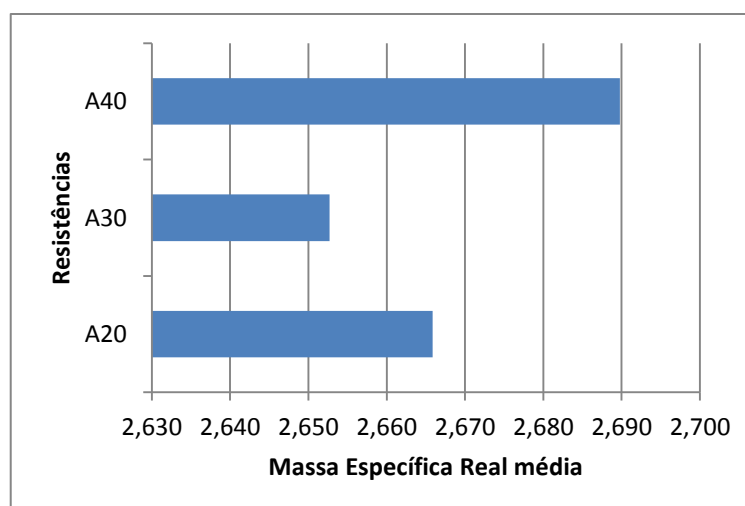


Figura 7.4 – Massa específica real – Pedrisco.

7. ANEXOS

7.3. Dados laboratoriais – Deformação Permanente (LCPC)

7.3.1. Traço AN

Seguem dados laboratoriais da Deformação Permanente (LCPC) para o traço AN na Tabela 7.20, Tabela 7.21, Tabela 7.22, Tabela 7.23, Tabela 7.24, Tabela 7.25, Tabela 7.26, Tabela 7.27, Tabela 7.28, Tabela 7.29, Tabela 7.30, Tabela 7.31, Tabela 7.32 e Tabela 7.33.

Tabela 7.20 – Leitura inicial – Lado Esquerdo – Traço AN.

	1	2	3	4	5
A	804	868	917	937	940
B	860	848	918	1.030	959
C	995	1.161	1.250	1.231	1.172

Tabela 7.21 – Leitura 100 ciclos – Lado Esquerdo – Traço AN.

	1	2	3	4	5
A	849	915	996	985	1.005
B	909	875	1.000	1.089	1.022
C	1.040	1.220	1.308	1.268	1.218

Tabela 7.22 – Leitura 300 ciclos – Lado Esquerdo – Traço AN.

	1	2	3	4	5
A	873	946	1.034	1.017	1.038
B	927	895	1.029	1.114	1.058
C	1.069	1.237	1.330	1.291	1.240

7. ANEXOS

Tabela 7.23 – Leitura 1000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço AN.

	1	2	3	4	5
A	897	986	1.083	1.049	1.072
B	960	922	1.062	1.155	1.112
C	1.115	1.219	1.325	1.321	1.276

Tabela 7.24 – Leitura 3000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço AN.

	1	2	3	4	5
A	940	1.029	1.136	1.084	1.113
B	998	962	1.112	1.202	1.149
C	1.152	1.300	1.384	1.352	1.306

Tabela 7.25 – Leitura 10000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço AN.

	1	2	3	4	5
A	995	1.084	1.192	1.143	1.165
B	1.060	1.020	1.160	1.260	1.196
C	1.225	1.365	1.420	1.408	1.363

Tabela 7.26 – Leitura 30000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço AN.

	1	2	3	4	5
A	1.045	1.136	1.230	1.189	1.213
B	1.118	1.062	1.258	1.310	1.247
C	1.275	1.408	1.460	1.450	1.414

Tabela 7.27 – Leitura inicial – Lado Direito – Traço AN.

	1	2	3	4	5
A	977	1.075	1.089	1.073	1.046
B	914	993	938	984	1.010
C	1.059	1.127	1.089	1.110	1.084

7. ANEXOS

Tabela 7.28 – Leitura 100 ciclos – Lado Direito – Traço AN.

	1	2	3	4	5
A	984	1.154	1.171	1.148	1.095
B	987	1.038	988	1.044	1.063
C	1.107	1.164	1.158	1.176	1.117

Tabela 7.29 – Leitura 300 ciclos – Lado Direito – Traço AN.

	1	2	3	4	5
A	1.013	1.185	1.212	1.175	1.116
B	1.018	1.066	1.010	1.075	1.078
C	1.130	1.186	1.190	1.209	1.135

Tabela 7.30 – Leitura 1000 ciclos – Lado Direito – Traço AN.

	1	2	3	4	5
A	1.037	1.219	1.246	1.207	1.147
B	1.053	1.094	1.037	1.110	1.105
C	1.156	1.205	1.227	1.236	1.157

Tabela 7.31 – Leitura 3000 ciclos – Lado Direito – Traço AN.

	1	2	3	4	5
A	1.073	1.254	1.280	1.236	1.168
B	1.090	1.123	1.068	1.142	1.122
C	1.185	1.233	1.264	1.274	1.183

Tabela 7.32 – Leitura 10000 ciclos – Lado Direito – Traço AN.

	1	2	3	4	5
A	1.114	1.315	1.329	1.282	1.210
B	1.123	1.173	1.127	1.190	1.162
C	1.220	1.275	1.306	1.315	1.217

7. ANEXOS

Tabela 7.33 – Leitura 30000 ciclos – Lado Direito – Traço AN.

	1	2	3	4	5
A	1.162	1.365	1.370	1.327	1.250
B	1.150	1.211	1.155	1.240	1.208
C	1.246	1.315	1.353	1.362	1.247

7.3.2. Traço A30G25

Seguem dados laboratoriais da Deformação Permanente (LCPC) para o traço A30G25 na Tabela 7.34, Tabela 7.35, Tabela 7.36, Tabela 7.37, Tabela 7.38, Tabela 7.39, Tabela 7.40, Tabela 7.41, Tabela 7.42, Tabela 7.43, Tabela 7.44, Tabela 7.45, Tabela 7.46 e Tabela 7.47.

Tabela 7.34 – Leitura inicial – Lado Esquerdo – Traço A30G25.

	1	2	3	4	5
A	1.042	1.077	1.036	1.028	925
B	1.038	1.157	1.138	1.156	900
C	1.265	1.416	1.424	1.307	1.081

Tabela 7.35 – Leitura 100 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G25.

	1	2	3	4	5
A	1.062	1.150	1.079	1.061	985
B	1.072	1.225	1.191	1.206	945
C	1.306	1.468	1.491	1.371	1.129

Tabela 7.36 – Leitura 300 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G25.

	1	2	3	4	5
A	1.072	1.175	1.089	1.077	1.010
B	1.086	1.254	1.205	1.225	967
C	1.312	1.496	1.510	1.392	1.145

7. ANEXOS

Tabela 7.37 – Leitura 1000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G25.

	1	2	3	4	5
A	1.086	1.210	1.110	1.097	1.044
B	1.106	1.286	1.230	1.252	997
C	1.334	1.526	1.528	1.418	1.168

Tabela 7.38 – Leitura 3000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G25.

	1	2	3	4	5
A	1.106	1.245	1.137	1.117	1.078
B	1.132	1.321	1.258	1.276	1.028
C	1.353	1.550	1.557	1.444	1.193

Tabela 7.39 – Leitura 10000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G25.

	1	2	3	4	5
A	1.134	1.285	1.152	1.144	1.116
B	1.172	1.376	1.293	1.315	1.067
C	1.382	1.580	1.572	1.476	1.216

Tabela 7.40 – Leitura 30000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G25.

	1	2	3	4	5
A	1.211	1.370	1.236	1.223	1.195
B	1.242	1.461	1.369	1.385	1.130
C	1.445	1.653	1.631	1.557	1.217

Tabela 7.41 – Leitura inicial – Lado Direito – Traço A30G25.

	1	2	3	4	5
A	1.117	1.201	1.264	1.167	986
B	982	1.078	1.092	1.114	894
C	1.175	1.302	1.310	1.218	1.123

7. ANEXOS

Tabela 7.42 – Leitura 100 ciclos – Lado Direito – Traço A30G25.

	1	2	3	4	5
A	1.176	1.269	1.331	1.242	1.029
B	1.028	1.130	1.148	1.185	929
C	1.219	1.370	1.394	1.276	1.152

Tabela 7.43 – Leitura 300 ciclos – Lado Direito – Traço A30G25.

	1	2	3	4	5
A	1.195	1.287	1.355	1.270	1.043
B	1.049	1.150	1.175	1.202	946
C	1.230	1.387	1.400	1.290	1.165

Tabela 7.44 – Leitura 1000 ciclos – Lado Direito – Traço A30G25.

	1	2	3	4	5
A	1.219	1.316	1.380	1.317	1.065
B	1.080	1.177	1.204	1.231	964
C	1.247	1.417	1.420	1.314	1.178

Tabela 7.45 – Leitura 3000 ciclos – Lado Direito – Traço A30G25.

	1	2	3	4	5
A	1.247	1.376	1.409	1.348	1.087
B	1.109	1.204	1.245	1.259	987
C	1.267	1.447	1.438	1.338	1.198

Tabela 7.46 – Leitura 10000 ciclos – Lado Direito – Traço A30G25.

	1	2	3	4	5
A	1.280	1.410	1.439	1.384	1.112
B	1.156	1.234	1.285	1.310	1.026
C	1.290	1.480	1.464	1.355	1.230

7. ANEXOS

Tabela 7.47 – Leitura 30000 ciclos – Lado Direito – Traço A30G25.

	1	2	3	4	5
A	1.361	1.475	1.522	1.462	1.188
B	1.220	1.290	1.311	1.375	1.285
C	1.340	1.540	1.530	1.420	1.273

7.3.3. Traço A30G50

Seguem dados laboratoriais da Deformação Permanente (LCPC) para o traço A30G25 na Tabela 7.48, Tabela 7.49, Tabela 7.50, Tabela 7.51, Tabela 7.52, Tabela 7.53, Tabela 7.54, Tabela 7.55, Tabela 7.56, Tabela 7.57, Tabela 7.58, Tabela 7.59, Tabela 7.60 e Tabela 7.61.

Tabela 7.48 – Leitura inicial – Lado Esquerdo – Traço A30G50.

	1	2	3	4	5
A	1.099	1.290	1.388	1.455	1.281
B	990	1.200	1.329	1.300	1.247
C	1.142	1.406	1.422	1.505	1.369

Tabela 7.49 – Leitura 100 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G50.

	1	2	3	4	5
A	1.127	1.327	1.416	1.495	1.317
B	1.031	1.236	1.373	1.346	1.280
C	1.175	1.466	1.471	1.559	1.402

Tabela 7.50 – Leitura 300 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G50.

	1	2	3	4	5
A	1.148	1.347	1.438	1.550	1.344
B	1.051	1.267	1.398	1.376	1.304
C	1.196	1.480	1.503	1.582	1.418

7. ANEXOS

Tabela 7.51 – Leitura 1000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G50.

	1	2	3	4	5
A	1.169	1.373	1.579	1.583	1.383
B	1.077	1.297	1.417	1.404	1.331
C	1.223	1.510	1.533	1.616	1.455

Tabela 7.52 – Leitura 3000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G50.

	1	2	3	4	5
A	1.200	1.405	1.612	1.593	1.411
B	1.106	1.331	1.457	1.443	1.355
C	1.245	1.545	1.568	1.649	1.485

Tabela 7.53 – Leitura 10000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G50.

	1	2	3	4	5
A	1.240	1.512	1.666	1.602	1.457
B	1.162	1.449	1.532	1.516	1.421
C	1.284	1.641	1.663	1.723	1.522

Tabela 7.54 – Leitura 30000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G50.

	1	2	3	4	5
A	1.278	1.550	1.731	1.651	1.506
B	1.213	1.510	1.632	1.581	1.466
C	1.340	1.698	1.762	1.780	1.565

Tabela 7.55 – Leitura inicial – Lado Direito – Traço A30G50.

	1	2	3	4	5
A	1.200	1.350	1.313	1.276	1.068
B	1.259	1.367	1.431	1.270	1.022
C	1.399	1.579	1.422	1.481	1.310

7. ANEXOS

Tabela 7.56 – Leitura 100 ciclos – Lado Direito – Traço A30G50.

	1	2	3	4	5
A	1.237	1.399	1.370	1.304	1.095
B	1.283	1.395	1.481	1.275	1.034
C	1.427	1.608	1.555	1.490	1.340

Tabela 7.57 – Leitura 300 ciclos – Lado Direito – Traço A30G50.

	1	2	3	4	5
A	1.261	1.434	1.400	1.326	1.120
B	1.290	1.406	1.501	1.285	1.042
C	1.437	1.623	1.566	1.505	1.356

Tabela 7.58 – Leitura 1000 ciclos – Lado Direito – Traço A30G50.

	1	2	3	4	5
A	1.291	1.462	1.426	1.362	1.145
B	1.313	1.425	1.519	1.309	1.056
C	1.455	1.640	1.582	1.520	1.371

Tabela 7.59 – Leitura 3000 ciclos – Lado Direito – Traço A30G50.

	1	2	3	4	5
A	1.359	1.519	1.496	1.404	1.182
B	1.339	1.450	1.540	1.325	1.070
C	1.474	1.660	1.610	1.538	1.395

Tabela 7.60 – Leitura 10000 ciclos – Lado Direito – Traço A30G50.

	1	2	3	4	5
A	1.397	1.589	1.574	1.470	1.228
B	1.379	1.487	1.587	1.371	1.106
C	1.509	1.698	1.653	1.573	1.412

7. ANEXOS

Tabela 7.61 – Leitura 30000 ciclos – Lado Direito – Traço A30G50.

	1	2	3	4	5
A	1.443	1.638	1.616	1.519	1.267
B	1.419	1.529	1.635	1.416	1.144
C	1.553	1.739	1.685	1.609	1.442

7.3.4. Traço A30G75

Seguem dados laboratoriais da Deformação Permanente (LCPC) para o traço A30G25 na Tabela 7.62, Tabela 7.63, Tabela 7.64, Tabela 7.65, Tabela 7.66, Tabela 7.67, Tabela 7.68, Tabela 7.69, Tabela 7.70, Tabela 7.71, Tabela 7.72, Tabela 7.73, Tabela 7.74 e Tabela 7.75.

Tabela 7.62 – Leitura inicial – Lado Esquerdo – Traço A30G75.

	1	2	3	4	5
A	1.175	1.410	1.592	1.421	1.140
B	1.200	1.440	1.533	1.459	1.113
C	1.564	1.723	1.838	1.708	1.500

Tabela 7.63 – Leitura 100 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G75.

	1	2	3	4	5
A	1.200	1.470	1.624	1.433	1.178
B	1.221	1.477	1.584	1.468	1.143
C	1.581	1.746	1.860	1.739	1.527

Tabela 7.64 – Leitura 300 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G75.

	1	2	3	4	5
A	1.229	1.510	1.650	1.448	1.201
B	1.240	1.510	1.605	1.484	1.148
C	1.589	1.767	1.881	1.765	1.534

7. ANEXOS

Tabela 7.65 – Leitura 1000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G75.

	1	2	3	4	5
A	1.246	1.521	1.670	1.463	1.255
B	1.252	1.512	1.620	1.502	1.165
C	1.604	1.770	1.896	1.780	1.548

Tabela 7.66 – Leitura 3000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G75.

	1	2	3	4	5
A	1.288	1.563	1.695	1.488	1.284
B	1.280	1.545	1.652	1.536	1.180
C	1.621	1.783	1.912	1.801	1.563

Tabela 7.67 – Leitura 10000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G75.

	1	2	3	4	5
A	1.405	1.674	1.821	1.578	1.380
B	1.323	1.614	1.796	1.677	1.229
C	1.718	1.840	2.022	1.891	1.644

Tabela 7.68 – Leitura 30000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G75.

	1	2	3	4	5
A	1.450	1.732	1.874	1.643	1.424
B	1.372	1.681	1.847	1.729	1.265
C	1.753	1.909	2.066	1.969	1.690

Tabela 7.69 – Leitura inicial – Lado Direito – Traço A30G75.

	1	2	3	4	5
A	1.326	1.374	1.333	1.253	1.111
B	1.325	1.390	1.295	1.249	1.101
C	1.638	1.617	1.561	1.481	1.393

7. ANEXOS

Tabela 7.70 – Leitura 100 ciclos – Lado Direito – Traço A30G75.

	1	2	3	4	5
A	1.373	1.431	1.375	1.303	1.147
B	1.368	1.438	1.335	1.306	1.147
C	1.670	1.665	1.589	1.508	1.435

Tabela 7.71 – Leitura 300 ciclos – Lado Direito – Traço A30G75.

	1	2	3	4	5
A	1.402	1.467	1.400	1.335	1.170
B	1.387	1.467	1.356	1.326	1.163
C	1.686	1.694	1.605	1.520	1.449

Tabela 7.72 – Leitura 1000 ciclos – Lado Direito – Traço A30G75.

	1	2	3	4	5
A	1.430	1.463	1.425	1.348	1.185
B	1.418	1.486	1.377	1.346	1.193
C	1.698	1.708	1.623	1.527	1.460

Tabela 7.73 – Leitura 3000 ciclos – Lado Direito – Traço A30G75.

	1	2	3	4	5
A	1.468	1.532	1.479	1.387	1.228
B	1.442	1.529	1.403	1.385	1.200
C	1.730	1.748	1.651	1.559	1.505

Tabela 7.74 – Leitura 10000 ciclos – Lado Direito – Traço A30G75.

	1	2	3	4	5
A	1.513	1.590	1.521	1.433	1.269
B	1.505	1.587	1.462	1.448	1.256
C	1.770	1.831	1.694	1.593	1.539

7. ANEXOS

Tabela 7.75 – Leitura 30000 ciclos – Lado Direito – Traço A30G75.

	1	2	3	4	5
A	1.551	1.645	1.582	1.500	1.317
B	1.539	1.629	1.520	1.500	1.317
C	1.818	1.881	1.755	1.620	1.582

7.3.5. Traço A30G100

Seguem dados laboratoriais da Deformação Permanente (LCPC) para o traço A30G25 na Tabela 7.76, Tabela 7.77, Tabela 7.78, Tabela 7.79, Tabela 7.80, Tabela 7.81, Tabela 7.82, Tabela 7.83, Tabela 7.84, Tabela 7.85, Tabela 7.86, Tabela 7.87, Tabela 7.88 e Tabela 7.89.

Tabela 7.76 – Leitura inicial – Lado Esquerdo – Traço A30G100.

	1	2	3	4	5
A	1.042	1.025	921	905	855
B	910	993	792	796	777
C	1.125	1.236	1.056	1.028	1.037

Tabela 7.77 – Leitura 100 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G100.

	1	2	3	4	5
A	1.131	1.145	1.059	1.056	981
B	1.044	1.144	947	986	904
C	1.203	1.341	1.141	1.192	1.156

Tabela 7.78 – Leitura 300 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G100.

	1	2	3	4	5
A	1.179	1.232	1.142	1.111	1.051
B	1.127	1.214	1.024	1.071	967
C	1.253	1.435	1.193	1.251	1.178

7. ANEXOS

Tabela 7.79 – Leitura 1000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G100.

	1	2	3	4	5
A	1.237	1.330	1.231	1.252	1.127
B	1.230	1.300	1.121	1.229	1.061
C	1.313	1.513	1.266	1.384	1.246

Tabela 7.80 – Leitura 3000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G100.

	1	2	3	4	5
A	1.333	1.460	1.346	1.317	1.253
B	1.341	1.405	1.242	1.347	1.144
C	1.377	1.622	1.344	1.458	1.310

Tabela 7.81 – Leitura 10000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G100.

	1	2	3	4	5
A	1.432	1.568	1.496	1.394	1.361
B	1.444	1.535	1.367	1.450	1.273
C	1.465	1.781	1.489	1.567	1.446

Tabela 7.82 – Leitura 30000 ciclos – Lado Esquerdo – Traço A30G100.

	1	2	3	4	5
A	1.531	1.706	1.670	1.465	1.433
B	1.629	1.645	1.490	1.539	1.329
C	1.559	1.909	1.613	1.659	1.487

Tabela 7.83 – Leitura inicial – Lado Direito – Traço A30G100.

	1	2	3	4	5
A	1.157	1.226	1.300	1.247	1.100
B	1.095	1.173	1.182	1.118	989
C	1.390	1.581	1.563	1.435	1.305

7. ANEXOS

Tabela 7.84 – Leitura 100 ciclos – Lado Direito – Traço A30G100.

	1	2	3	4	5
A	1.252	1.346	1.397	1.334	1.175
B	1.172	1.281	1.289	1.231	1.061
C	1.461	1.662	1.655	1.535	1.356

Tabela 7.85 – Leitura 300 ciclos – Lado Direito – Traço A30G100.

	1	2	3	4	5
A	1.300	1.382	1.440	1.369	1.242
B	1.208	1.325	1.339	1.276	1.136
C	1.478	1.698	1.695	1.569	1.376

Tabela 7.86 – Leitura 1000 ciclos – Lado Direito – Traço A30G100.

	1	2	3	4	5
A	1.341	1.430	1.473	1.385	1.259
B	1.249	1.368	1.359	1.304	1.144
C	1.506	1.729	1.720	1.615	1.401

Tabela 7.87 – Leitura 3000 ciclos – Lado Direito – Traço A30G100.

	1	2	3	4	5
A	1.373	1.476	1.518	1.429	1.268
B	1.290	1.416	1.417	1.347	1.163
C	1.531	1.762	1.758	1.644	1.427

Tabela 7.88 – Leitura 10000 ciclos – Lado Direito – Traço A30G100.

	1	2	3	4	5
A	1.428	1.525	1.615	1.473	1.333
B	1.332	1.477	1.465	1.421	1.210
C	1.560	1.813	1.804	1.721	1.466

7. ANEXOS*Tabela 7.89 – Leitura 30000 ciclos – Lado Direito – Traço A30G100.*

	1	2	3	4	5
A	1.482	1.605	1.696	1.537	1.391
B	1.418	1.555	1.560	1.491	1.273
C	1.606	1.875	1.885	1.776	1.522